Technische Universität Braunschweig

Institut für Geoökologie
Abteilung für Bodenkunde und Bodenphysik

Inverse Modellierung des Wassertransports in Großlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

vorgelegt von

Katharina Meurer

Erstprüfer: Prof. Dr. Wolfgang Durner
Zweitprüfer: Dr. Volker Prasuhn

Braunschweig, den 21. Juni 2012

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank an diejenigen Personen aussprechen, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.
Mein besonderer Dank geht an Prof. Dr. Wolfgang Durner, der diese Arbeit federführend betreut hat. Durch seine Erfahrung und fachliche Kompetenz wurden mir immer neue Denkanstöße gegeben und dadurch viele offene Fragen beseitigt. Vielen Dank für die regelmäßigen Treffen, die vielen fachlichen Gespräche und andauernde Motivierung, immer wieder neue Ansätze auszuprobieren. Ich habe sehr viel gelernt in dieser Zeit und bin mir sicher, die neuen Blickwinkel weiterhin gut gebrauchen und anwenden zu können.
Vielen Dank an Dr. Volker Prasuhn, der sich als Zweitprüfer zur Verfügung stellte, für die Bereitstellung der Daten und die andauernde Unterstützung und Aufklärung bei aufkommenden Fragen. Auch die kleinsten Unsicherheiten konnten somit trotz der großen Distanz rasch geklärt werden.
Ich danke vielmals Dr. Sascha Christian Iden für seine permamente Hilfe bei der Modellierung. Danke für die offene Tür und die Geduld, die mir immer entgegengebracht wurde und die vielen Gespräche und neuen Ansätze während dieser Zeit.
Dr. Henrike Schelle danke ich ganz besonders für die vielen ausführlichen Gespräche und Diskussionen, in denen sie geduldig ihre Erfahrungen mit Lysimeterdaten und deren Aufbereitung mit mir teilte. Diese Unterstützung war mir eine unbeschreiblich große Hilfe und hat für mich zu neuen Ideen und Erkenntnissen geführt. Ganz lieben Dank für die Geduld, die Tipps und Anregungen, ob im Rahmen der Tagung oder bei der Fertigstellung dieser Arbeit.
Ich möchte allen Mitarbeitern der Abteilung für Bodenkunde und Bodenphysik für das angenehme Arbeitsklima danken, das mir das Arbeiten stark erleichtert hat.
Mein Dank geht an Dr. Siegfried Schittenhelm vom Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung des von Thünen Instituts in Braunschweig für die Bereitstellung der Leaf Area Indizes. Auf Basis dieser Daten war es mir möglich, das Pflanzenwachstum und dadurch die Wurzelwasseraufnahme in die Modellierung mit aufzunehmen.
Manuela und Friederike, habt vielen Dank für die hilfreichen Verbesserungen und sprachlichen Korrekturen dieser Arbeit.
Danke, Christoph, zum einen für die sprachliche Korrektur der Arbeit, aber auch für die Unterstützung und die vielen Hilfestellungen in den letzten Monaten.
Ich danke meiner Familie, speziell meinen Eltern für die Unterstützung während der letzten 5 Jahre, ohne dieses Studium für mich nicht möglich gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung i

Tabellenverzeichnis iv

Abbildungsverzeichnis vi

1 Einleitung 3

2 Material und Methoden 5

2.1 Die Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz 5
2.2 Datenerfassung 8
2.2.1 Gewicht und Sickerwasser 8
2.2.2 Bodenfeuchte und Matrixpotentiale 9
2.2.3 Meteorologische Daten 10
2.3 Datenaufbereitung 11
2.3.1 Ermittlung des Leaf Area Index 11
2.3.2 Korrektur des Lysimetergewichts 12
2.3.3 Niederschlag und Verdunstung 13
2.3.4 Aufteilung der Evapotranspiration 15
2.3.5 Wurzeltiefe 16
2.4 Numerisches Modell 16
2.4.1 Ungesättigter Wasserfluss 16
2.4.2 Wurzelwasseraufnahme 18
2.4.3 Anfangs- und Randbedingungen 20
2.5 Ermittlung bodenhydraulischer Eigenschaften 21
2.5.1 Pedotransferfunktion 21
2.5.2 In situ-Bestimmung 22
2.5.3 Inverse Modellierung 23

3 Ergebnisse und Diskussion 25

3.1 Tensionen und Bodenfeuchte 25
3.2 Obere Randbedingung 32
3.3 Simulationen 37
3.3.1 Vorhersagen 37
3.3.2 Inverse Modellierung mit Tensionsdaten 37

3.3.3 Inverse Modellierung ohne Tensionsdaten 40

4 Fazit und Ausblick **47**

Eidesstattliche Erklärung **55**

Anhang **56**

Tabellenverzeichnis

1 Anzahl und Bodentypen der entnommenen Monolithen (aus Prasuhn, 2009). 5

2 Bodenkundliche Eigenschaften der drei Bodentypen. GPV = Grobporenvolumen, n.b. = nicht bestimmt. 7

3 Ermittelte Parameter für die Wachstumsfunktion des Leaf Area Indizes für Mais und Weizen. 12

4 Bewirtschaftung der Lysimeter, Saat- und Erntetermine und die Vegetationsdauer für Körnermais und Winterweizen. 13

5 Über Veränderungen des Lysimetergewichts ermittelte Pflanzengewichte zum Erntezeitpunkt. 13

6 Parameter für die Wasserstressfunktion für Mais und Weizen nach Wesseling (1991). 19

7 Eingabeparameter für die Pedotransferfunktion Rosetta Lite (Schaap et al., 2001). 22

8 Messungenauigkeiten und Wichtungen der Parameter innerhalb der Zielfunktion. n.b. = nicht bekannt. 23

9 Termine der zusätzlichen Eingriffe an den Lysimetern im Rahmen der Bewirtschaftung. 25

10 Bodenhydraulische Eigenschaften der Böden aus Grafenried, Reckenholz und Schafisheim aus der Anpassung an die in situ gemessenen Retentionsdaten und Rosetta Lite (Schaap et al., 2001). 32

11 Root Mean Square Errors (RMSE) der inversen Simulationen für Lysimeter 1 (Grafenried). Q = kumulatives Sickerwasser, Θ = mittlerer Wassergehalt, h_d = Tensionsmessungen in der Tiefe d. VGM = van Genuchten-Mualem, II = höhere Wichtung der Matrixpotentiale (0,01), FF = Free-Form. 40

12 Root Mean Square Errors (RMSE) der Ergebnisse der inversen Simulationen der Szenarien für Lysimeter 1 (Grafenried) mit dem van Genuchten-Mualem-Modell. 43

13 Durch inverse Modellierung ermittelte van Genuchten-Mualem-Parameter (VGM) der drei Szenarien Körnermais, Winterweizen und Körnermais + Winterweizen. Zusätzlich ist die Standardabweichung σ der geschätzten Parameter angegeben. 47

14 Root Mean Square Errors (RMSE) der Ergebnisse der inversen Simulationen der unterschiedlichen Szenarien. RH = Reckenholz, SH = Schafisheim, M = Maisperiode, W = Weizenperiode. 57
15 Durch inverse Modellierung ermittelte bodenhydraulische Eigenschaften der drei Szenarien Körnermais, Winterweizen und Körnermais + Winterweizen für Lysimeter 5 (Reckenholz) und 12 (Schafisheim). Zusätzlich ist die Standardabweichung σ der geschätzten Parameter angegeben. VGM = van Genuchten-Mualem. 64

Abbildungsverzeichnis

1 Bodenprofile der Standorte Grafenried (a), Reckenholz (b) und Schafisheim (c) (Prasuhn, 2010). 6
2 Einteilung der Lysimeter gemäß untersuchter Fragestellung (Prasuhn, 2010). 6
3 Aufbau der wägbaren (links) und nicht wägbaren (rechts) Lysimeter (Prasuhn, 2010). 8
4 Links: Equitensiometer für Messungen in 10 cm Tiefe (UGT, 2011). Mitte: Drucktensiometer Tensio 150 (UGT, 2009). Rechts: Bodenfeuchtesensor ThetaProbe ML2x (Delta-T Devices, 1999). 9
5 Leaf Area Index [-] für Mais (a) und Weizen (b). 12
6 Gewichtsveränderung des Lysimeters 5 zwischen dem 26.04. und 28.04.09 bei vorheriger Berücksichtigung des kumulativen Sickerwassers. Gewichtsabnahmen werden der Verdunstung zugeteilt; Gewichtszunahmen resultieren aus auftreffendem Niederschlag. 14
7 Wasserstressfunktion ω [-] bei unterschiedlichen Raten der potentiellen Transpiration T_p (nach Feddes et al., 1978 aus Simunek & Hopmans, 2009, verändert). 19
8 Stündliche Daten der FDR-Messungen in 10 und 30 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10. Zusätzliche Markierung der Eingriffe am Lysimeter (schwarz), Bodenbearbeitung (rot) und Pflanzenaussaat oder -ernte (grün: Körnermais, gelb: Winterweizen) für Lysimeter 5. 26
9 Stündliche Daten der FDR-Messungen in 60 und 90 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10. 27
10 Stündliche Daten der Tensionsmessungen in 10 und 30 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10. 28
11 Retentionskurven der Rohdaten in den 4 Tiefen 10, 30, 60 und 90 cm der Lysimeter 1 (a), 5 (b) und 12 (c). 29
12 Gegenüberstellung der Wassergehalts- und Tensionsdaten in den Tiefen 10 (a), 30 (b), 60 (c) und 90 cm (d) für den Zeitraum 13.07 - 03.08.09 auf Stundenbasis und entsprechende Niederschlagsdaten. 30
13 An die gemessenen Tensions- und Wassergehaltsdaten angepasste Retentionsfunktionen (schwarz) für die Böden aus Grafenried (a), Reckenholz (b) und Schafisheim (c). Es wurden zusätzliche Punkte bei pF 3,5 und 4 generiert (ausgefüllt). Blau: Retentionskurven aus Rosetta Lite. 31

14 Aus den Gewichtsänderungen des Lysimeters 7 ermittlete kumulativer Niederschlag (a) und Evapotranspiration (b) für zeitliche Auflösungen von 5 Minuten und 1 Stunde, sowie meteorologischer Niederschlag (10 Minuten) und ET0 nach Penman-Monteith. 32
15 Windgeschwindigkeiten [$\mathrm{m\,s^{-1}}$] in 2 m Höhe in dem Zeitraum vom 1.4.09 - 2.09.10 (a). Verteilung der Windrichtungen und -stärken (b). 34
16 Vergleich der Verwendung verschiedener zeitlicher Auflösungen der Gewichtsänderungen des Lysimeters 7 zur Bestimmung des relevanten Niederschlags (a) und der Evapotranspiration (b). 35
17 Gewichtsveränderung in der Nacht vom 30.04. 19:00 - 01.05.09 8:00. Der graue Abschnitt signalisiert den Einfluss von Tau in den frühen Morgenstunden. Es wurde in diesem Zeitraum kein Sickerwasser und kein Niederschlag gemessen. 36
18 Obere Randbedingung des Lysimeters 1 für den Zeitraum 1.4.09 - 1.9.10. Täglicher Niederschlag (blau), Evaporation (grau) und Transpiration (grün)(a). Kumulativer Niederschlag, Evapotranspiration und Sickerwasser (b). Die Evapotranspiration ist zusätzlich aufgeteilt in Evaporation und Transpiration. 36
19 Vorhersagen des Sickerwassers über Vorwärtssimulationen anhand der in situ-Daten (a) und der Pedotransferfunktion Rosetta Lite (b). 37
20 Kumulatives Sickerwasser (a), profilgemittelter Wassergehalt (b) und Tensionsmessungen in den Tiefen 30 (c), 60 (d) und 90 cm (e). Inverse Simulation mit dem van Genuchten-Mualem-Modell (schwarz), mit stärkerer Wichtung (grau) und dem Free-Form-Modell (blau). 39
21 Kumulatives Sickerwasser (a) und profilgemittelter Wassergehalt (b). Inverse Simulation (schwarze Linie) mit dem VGM-Modell. 41
22 Kumulatives Sickerwasser (a) und profilgemittelter Wassergehalt (b). Inverse Simulation (schwarze Linie) für die Vegetationsphase des Körnermais. 42
23 Kumulatives Sickerwasser (a) und profilgemittelter Wassergehalt (b). Inverse Simulation (schwarze Linie) für die Vegetationsphase des Winterweizens. 43
24 Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) für Lysimeter 1 (Grafenried). Verglichen werden die Vorwärtssimulationen (in situ und Rosetta) und die inverse Modellierung. Die grauen Bereiche repräsentieren die 95 %-Konfidenzintervalle. 44

25 Geschätzte Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) für Lysimeter 1 (Grafenried) für die drei Szenarien. 44
26 95%-Konfidenzintervalle der Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) für die drei Szenarien. 45
27 Tägliche Daten der FDR-Messungen in 10 und 30 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10. 56
28 Tägliche Daten der Tensionsmessungen in 60 und 90 cm Tiefe vom 1.04-09 - 1.09.10 für Lysimeter 5. 57
29 Tägliche Daten der Tensionsmessungen in 10 und 30 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10. 58
30 Obere Randbedingung der Lysimeters 5 (a) und 12 (b) für den Zeitraum 1.4.09 - 1.9.10. 58
31 Korrigierte Retentionskurven der Lysimeter 1 (a), 5 (b) und 12 (c). . . . 59
32 Retentions- (a) und Leitfähigkeitskurve (b) für Lysimeter 1 (Grafenried) mit dem Free-Form-Ansatz (FF). Die grünen Punkte stellen die ermittelten bodenhydraulischen Parameter dar. Θ_s und K_s jeweils bei pF 0. . . . 59
33 Kumulatives Sickerwasser (a und c) und profilgemittelter Wassergehalt (b und d) und inverse Simulation (schwarze Linie) der Lysimeter 5 (oben) und 12 (unten). 60
34 Vorhersagen des Sickerwassers anhand der in situ-Daten (a und c) und der Pedotransferfunktion Rosetta Lite (b und d) für Lysimeter 5 (oben) und 12 (unten). 61
35 Kumulatives Sickerwasser (a und c) und profilgemittelter Wassergehalt (b und d) und inverse Modellierung (schwarze Linie) des Lysimeters 5 für die Abschnitte Mais (oben) und Weizen (unten). 62
36 Kumulatives Sickerwasser (a und c) und profilgemittelter Wassergehalt (b und d) und inverse Modellierung (schwarze Linie) des Lysimeters 12 für die Abschnitte Mais (oben) und Weizen (unten). 63
37 Retentions- (a und c) und Leitfähigkeitsfunktionen (b und d) für Lysimeter 5 (Reckenholz) und 12 (Schafisheim). Verglichen werden die Vegetationsperdioden für Mais, Weizen und die Gesamtsimulation. 65
38 95%-Konfidenzintervalle der Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) der drei Szenarien für Lysimeter 5 (Reckenholz). 66
39 95%-Konfidenzintervalle der Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) der drei Szenarien für Lysimeter 12 (Schafisheim). 67

Zusammenfassung

Die Bestimmung bodenhydraulischer Eigenschaften wird üblicherweise an kleinen Proben im Labor durchgeführt. Die damit gewonnenen Ergebnisse sind allerdings nur bedingt auf größere Skalen übertragbar. Für die Ermittlung von Bodenhaushaltsgrößen im freien Feld eignet sich die Verwendung von Lysimetern, da sie den natürlichen Wechselwirkungen zwischen Boden, Atmosphäre und Pflanzen ausgesetzt sind und auf einer für die Bodenzone relevanten Längenskala operieren. Das Ziel dieser Arbeit war die Erfassung von Wasserhaushaltsprozessen und die Ableitung effektiver bodenhydraulischer Eigenschaften durch inverse Modellierung der Wasserdynamik unter atmosphärischen Randbedingungen. Dazu wurden Daten von bewachsenen wägbaren Großlysimeter der Forschungsstation Zürich-Reckenholz verwendet. Die inverse Simulation erfolgte mit dem Programm HYDRUS-1D, basierend auf der Richards-Gleichung. Für die Parametrisierung der bodenhydraulischen Eigenschaften wurden das van Genuchten-Mualem Modell und frei geformte Funktionen verwendet. Die obere Randbedingung wurde aus den Daten der Wasserbilanz des Lysimeters in sechs-stündiger Auflösung abgeleitet. Zu hohe oder zu niedrige zeitliche Auflösungen führten zu Über-, bzw. Unterschätzungen des Niederschlags und der tatsächlichen Evapotranspiration. Die inverse Simulation lieferte über einen Zeitraum von zwei Wachstumsperioden gute Anpassungen an die Daten des kumulativen Sickerwassers, sowie des profilgemittelten Wassergehalts im Lysimeter. Die Einbeziehung von Tensionsdaten in die Zielfunktion lieferte eine weniger zufriedenstellende Beschreibung der Messdaten; insbesondere die Tensionsdaten im Lysimeter konnten durch effektive hydraulische Eigenschaften nicht korrekt beschrieben werden. Bei Betrachtung der jeweiligen Wachstumsperiode nur einer Feldfrucht zeigten sich Unterschiede hinsichtlich der geschätzten effektiven bodenhydraulischen Eigenschaften verglichen mit der Simulation beider Wachstumsperioden zusammen.

Abstract

Estimation of soil hydraulic properties is usually based on small laboratory samples which do not reflect field conditions. Lysimeters are very suitable for the estimation of soil hydraulic properties because they are exposed to atmospheric conditions that reflect the relationship between soil, plants and atmosphere, and operate on a scale that is relevant for the vadose zone. The aim of this study was the analysis of the water balance and the derivation of effective hydraulic properties by inverse modelling of the water dynamics under atmospheric boundary conditions. For doing so data of the overgrown weighable large lysimeters of the research station Zürich-Reckenholz was used. The inverse modelling was done with the program HYDRUS-1D based on the Richards equation. The van Genuchten-Mualem model was used for the parametrisation of soil hydraulic properties, as well as free formed functions. The upper boundary condition was calculated in six-hourly resolution out of the data of the waterbalance of the lysimeter. Very high or very low temporal resolutions led to over- and underestimation of precipitation and real evaporation, respectively. The inverse simulation provided good adaptions to the data of cumulative outflow and the profile-averaged water content in the lysimeter over a time frame of two vegetation periods. The inclusion of pressure head data into the objective function provided a less satisfying description of the measured data; especially the pressure head data in the lysimeter could not be descibed by effective hydraulic properties. Regarding the respective vegetation period with just one crop showed differences according to the estimated effective soil hydraulic properties compared with the simulation of both periods at the same time.

1 Einleitung

Die Modellierung des Wasserflusses erfordert eine präzise Abschätzung bodenhydraulischer Eigenschaften in Form der Retentionskurve, der gesättigten und ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Es existieren inzwischen zahlreiche Methoden, um diese Parameter direkt zu bestimmen; allerdings erweisen sich diese in den meisten Fällen als sehr kostspielig und zeitaufwändig und sind in der Regel begrenzt hinsichtlich der Spannweite der abgedeckten Wassergehalte (Simunek et al., 1998). Als Alternative zur direkten Messung dieser Parameter im Labor oder im freien Feld steht die inverse Modellierung (Radcliff & Simunek, 2010). Laut Iden et al. (2011) ist die inverse Modellierung zur Bestimmung bodenhydraulischer Eigenschaften unter Laborbedingungen und bei kontrollierten Randbedingungen bereits etabliert, stellt allerdings auf der Plot- und Feldskala eine große Herausforderung dar. Gründe dafür sind neben der Heterogenität der Böden die Schwierigkeit der Parametrisierung der Wurzelwasseraufnahme und die fehlerhafte Bestimmung atmosphärischer Randbedingungen, sowie der Flüsse aus der durchwurzelten Zone in tiefere Bodenschichten.
Der Einsatz von Lysimetern zur Erfassung des Wasser- und Stofftransports im Boden ist inzwischen weit verbreitet. Ein besonderer Vorteil ist die genaue Bestimmung der Randbedingungen in diesen Systemen. Mithilfe wägbarer Lysimeter ist es möglich, Wassergehaltsänderungen, bzw. die Menge an Wasser und gelösten Stoffen, die durch das gewählte Bodenprofil perkoliert, genau zu bestimmen (Meissner et al., 2000, Meissner et al., 2007). Inzwischen sind Lysimeter zu einem Standardwerkzeug für die Messung der tatsächlichen Evapotranspiration geworden (Howell et al., 1995, Yang et al., 1999), wodurch eine genaue Quantifizierung der gesamten Wasserbilanz möglich ist. Im weiteren Sinne können dadurch hydrologische Modelle entwickelt und getestet werden (Meissner & Seyfahrt, 2004).
Für die Modellierung des Wassertransports im Boden ist die korrekte Angabe der oberen und unteren Randbedingung von großer Bedeutung. Laut Zurmühl (1998) wird der Wasserfluss innerhalb eines Lysimeters vor allem durch den Fluss über den oberen Rand gesteuert. Loos et al. (2006) nennen die Evapotranspiration als treibende Kraft der Wasserbilanz. Weitere wichtige Aspekte sind die Erfassung des Sickerwassers, sowie die zeitliche Auflösung der Gewichtsmessung. Für die Ermittlung der Wasserdynamik innerhalb eines Lysimeters werden häufig Messsonden für Bodenfeuchte und/oder Wasserspannung in mehreren Tiefen installiert.
Die wägbaren Lysimeter der Forschungsstation Zürich-Reckenholz bieten durch die tech-

nische Ausstattung die Möglichkeit, eine Vorstellung über den Wasserfluss und den damit verbundenen Stofftransport zu bekommen. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Nachbildung des Wasserflusses durch die Richards-Gleichung und der daraus möglichen Ermittlung der bodenhydraulischen Eigenschaften. Als Grundlage dafür dienen Messdaten des Sickerwassers und des Gewichts, sowie der Bodenfeuchte und des Matrixpotentials in vier verschiedenen Tiefen. Untersucht wurden Böden von drei unterschiedlichen Standorten in der Schweiz über einen Zeitraum von 17 Monaten. Die Vegetationsperioden von Körnermais und Winterweizen wurden sowohl zusammen, als auch separat voneinander betrachtet.

2 Material und Methoden

2.1 Die Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz

Die Lysimeteranlage der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon wurde im Herbst 2008 installiert und im Frühling 2009 erfolgreich gestartet. Das Hauptziel der Anlage liegt in der Erfassung des Sickerwassers, sowie der Untersuchung der Nitratauswaschung. Die Lysimeteranlage umfasst insgesamt 72 Großlysimeter mit einer Oberfläche von je 1 m^2 und einer Tiefe von 1,50 m. Die Lysimeter enthalten weitgehend ungestörten, gewachsenen Boden von drei verschiedenen Ackerstandorten in der Schweiz (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anzahl und Bodentypen der entnommenen Monolithen (aus Prasuhn, 2009).

Standort	Bodentyp	Anzahl (wägbar)
Grafenried	sandig-lehmige Parabraunerde über Grundmoräne	48 (8)
Reckenholz	lehmig-schluffige, pseudovergleyte Braunerde über Grundmoräne	12 (2)
Schafisheim	lehmige Parabraunerde über Schotter	12 (2)

In den oberen 1,35 m befindet sich der gewachsene Boden, darunter ist eine 15 cm mächtige Sand-Kies-Packung eingebracht. Dabei handelt es sich um insgesamt drei Filterschichten von 5 cm Dicke, die jeweils unterschiedliche Korngrößen (0,1 - 0,5 mm; 0,71 - 1,25 mm; 3,15 - 5,60 mm) aufweisen. Das Filtermaterial ist inert und durch Vorbehandlungen gut gereinigt, sodass die stofflichen Zusammensetzungen der aufgefangenen Sickerwässer nicht verändert werden (Prasuhn et al., 2009). Durch diese grobe Schichtabfolge am unteren Rand sind die Lysimeter frei dränend. In Tabelle 2 sind die drei Bodentypen, sowie die Anzahl der Lysimeter aufgelistet. Eine bodenkundliche Ansprache, sowie physikalische und chemische Versuche im Labor wurden für alle Bodentypen durchgeführt. Die Bodenprofile der Standorte Schafisheim, Grafenried und Reckenholz sind in Abbildung 1 zu sehen.

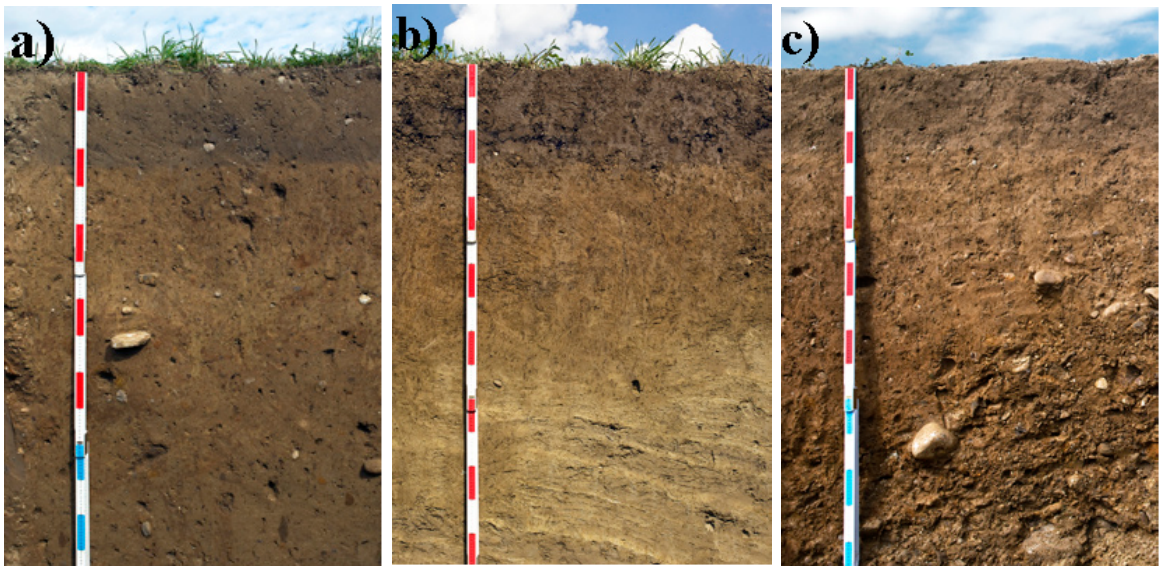

Abbildung 1: Bodenprofile der Standorte Grafenried (a), Reckenholz (b) und Schafisheim (c) (Prasuhn, 2010).

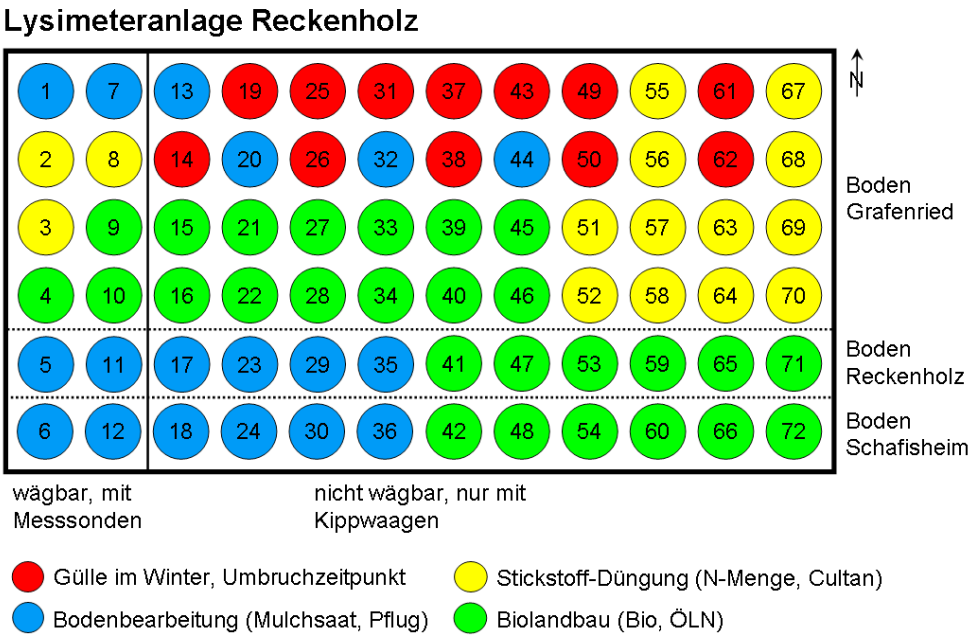

Abbildung 2: Einteilung der Lysimeter gemäß untersuchter Fragestellung (Prasuhn, 2010).

Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes dienen die Lysimeter dazu, den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Nitratauswaschung zu untersuchen. Dabei werden

nicht nur Varianzen in der Menge und Technik der Stickstoffdüngung betrachtet, sondern auch verschiedene Bodenbearbeitungen und Umbruchtermine analysiert. Zusätzlich dazu unterliegen 27 Lysimeter dem Vergleich des Biolandbaus mit dem Anbau gemäß ökologischem Leistungsnachweis (ÖLN) (Abbildung 2). Die Böden werden je nach Fragestellung ackerbaulich genutzt, wobei die Bewirtschaftung von Hand durchgeführt wird. Die Lysimeter sind nicht in eine ackerbaulich genutzte Fläche eingebunden, sondern werden individuell bepflanzt und bewirtschaftet. Die Lysimeter, deren Daten dieser Arbeit zugrunde liegen, werden hinsichtlich der Auswirkung des Bodenbearbeitungsverfahrens auf die Nitratauswaschung untersucht.
Unterschieden wird dabei zwischen konventioneller Bodenbearbeitung mit dem Pflug und Mulchsaat, bzw. Grubberbearbeitung bis in eine Tiefe von 10 cm. Für beide Verfahren sind zwei Lysimeter je Bodentyp eingeteilt. Der Boden aus Grafenried wird in den Lysimetern 1 und 7 beobachtet; der Boden aus Reckenholz in den Lysimetern 5 und 11. Die beiden Lysimeter 6 und 12 beinhalten den Boden aus Schafisheim. In dieser Arbeit wurden die Datensätze je eines Lysimeters pro Bodentyp bearbeitet (Lysimeter 1, 5 und 12).

Tabelle 2: Bodenkundliche Eigenschaften der drei Bodentypen. GPV = Grobporenvolumen, n.b. = nicht bestimmt.

	Horizont	Tiefe [cm]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	ρ_b $[g\,cm^{-3}]$	GPV [%]
Grafenried	Ahp	0 - 25	52	32	16	1,45	45
	Bcn	25 - 65	55	26	19	1,56	42
	B(g)(t)	65 - 110	57	25	18	1,60	41
	Bg(t)	110 - 150	59	24	17	1,62	n.b.
Reckenholz	Ahp	0 - 25	27	49	24	1,36	48
	Abcn	25 - 32	24	53	23	n.b.	n.b.
	Bcn(g)(x)	32 - 65	20	49	31	1,44	47
	Bg	65 - 85	21	46	33	1,39	49
	BCg	85 - 105/135	20	61	19	1,61	41
	Cg	105/135 - 150	17	65	18	n.b.	n.b.
Schafisheim	Ahp	0 - 27	55	28	17	1,50	43
	Be	27 - 60	47	31	22	1,53	43
	Bit	60 - 85	55	19	26	1,47	45
	lt,cn	85 - 110/125	49	23	28	n.b.	n.b.
	BC/C	110/125 - 150	55	21	24	n.b.	n.b.

2.2 Datenerfassung

Die Entnahme der Bodenmonolithen, der Aufbau des begehbaren Kellers und die technische Ausstattung der Lysimeteranlage wurde von der Firma UGT (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg) durchgeführt, die ebenfalls für regelmäßige Wartungen zuständig ist. Im Folgenden wird die technische Ausstattung der Lysimeter, sowie die damit verbundene Datenerfassung genauer erläutert.

2.2.1 Gewicht und Sickerwasser

Insgesamt sind 12 der 72 Großlysimeter wägbar, 60 sind nicht wägbar. Für alle Lysimeter wird das Sickerwasser über 100 mL Kippwaagen automatisch erfasst. Die wägbaren Lysimeter sind auf verstellbaren Hubtischen angebracht, die es ermöglichen, die Monolithen im Rahmen von Inventurarbeiten abzusenken (Abbildung 3). Die nicht wägbaren Lysimeter hingegen sind auf Betonsockeln platziert, wo sie über Schwerlastgelenkfüße in drei verschiedenen Höhen justiert werden können. Durch ausgefeilte und stetig verbes-

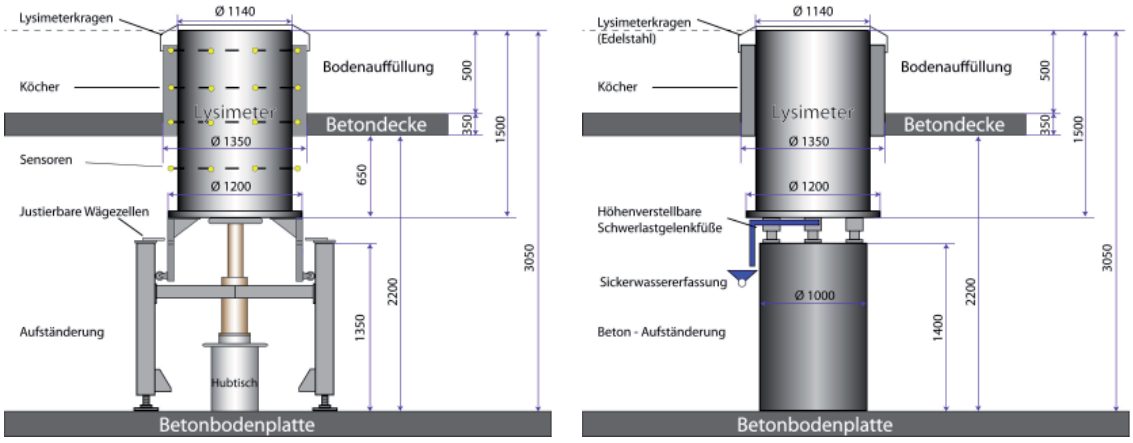

Abbildung 3: Aufbau der wägbaren (links) und nicht wägbaren (rechts) Lysimeter (Prasuhn, 2010).

serte Messtechniken, sind die verwendeten Wägezellen in der Lage, das aufgezeichnete Gewicht des jeweiligen Lysimeters auf unter 10 g genau anzugeben. Dies wird durch drei Präzisions-Scherstab-Wägezellen erreicht. Die erhobenen Daten werden über einen digitalen Wägemonitor (UGT WM 100) direkt gespeichert. Mittels Zentral-Computer können sämtliche Messdaten aller Lysimeter, sowie die Steuerung des Wägesystems zentral verwaltet werden.

2.2.2 Bodenfeuchte und Matrixpotentiale

Zur sicheren Abschätzung des Wasserflusses innerhalb der wägbaren Lysimeter sind zahlreiche Sensoren in zweifacher Wiederholung in vier Tiefen (10 cm, 30 cm, 60 cm und 90 cm) installiert. Die Erhebung von Wassergehaltsdaten durch FDR-Sonden (Frequency Domain Reflectometry) bietet vor allem in Hinblick auf den Stofftransport eine gute Basis für die Abschätzung der potentiell verfügbaren Menge an gelösten Stoffen in der jeweiligen Tiefe, bzw. dem Bodenhorizont (Böhm, 2002). Die Betrachtung der Bodenfeuchte in den Lysimetern erfolgt über den Sensor ThetaProbe ML2x (Abbildung 4), der einen sehr weiten Messbereich von 0 bis 1 [m^3 m^{-3}] abdeckt. Der volumetrische Wassergehalt wird dabei durch Veränderungen der Dielektrizitätskonstanten im Boden ermittelt (Delta-T Devices, 1999). Im Messbereich von 0,05 - 0,6 [m^3 m^{-3}] ist eine Genauigkeit von 0,01 [m^3 m^{-3}] angegeben. Böhm (2002) bezeichnet die FDR-Sonden, wie beispielsweise ThetaProbe ML2x, als weniger gut geeignet bei der Erfassung von Wasserhaushaltsänderungen, da Effekte von Be- und Entwässerung zeitlich verzögert sichtbar werden. Für diesen Aspekt ist der Einsatz von Tensiometern unverzichtbar. In den Monolithen werden dazu zwei verschiedene Typen von Tensiometern eingesetzt. In 10 cm Tiefe sind Equitensiometer des Typs EQ15 der Firma Ecomatik eingebaut, welche einen Messbereich von 0 bis -15.000 hPa besitzen. Im Bereich von 0 bis -1000 hPa liegt die Genauigkeit der Sensoren bei 5 kPa; in niedrigeren Potentialbereichen liegt die Abweichung bei etwa 5 %. Aufgrund des weiten Messbereichs kann vor allem während der Vegetationsperiode der gesamte Potentialbereich bis -15.000 hPa (permanenter Welkepunkt) erfasst und verfolgt werden. Die größeren Tiefen sind mit Druckwandlertensiometern versehen, deren Messbereich von 0 bis -850 hPa reicht (Abbildung 4). Ihre Genauigkeit liegt bei 3 hPa im gesamten Messbereich.
Ein durchaus wichtiger Unterschied zwischen den Tensiometertypen ist die Unabhängigkeit des Equitensiometers von manueller Wiederbefüllung, da es auch nach Unterschrei-

Abbildung 4: Links: Equitensiometer für Messungen in 10 cm Tiefe (UGT, 2011). Mitte: Drucktensiometer Tensio 150 (UGT, 2009). Rechts: Bodenfeuchtesensor ThetaProbe ML2x (Delta-T Devices, 1999).

tung der Messgrenze nicht ausfällt (Ecomatik, 2009). Die Drucktensiometer hingegen fallen in diesem Fall aus und müssen von Hand befüllt und die Messung danach fortgesetzt werden. Dadurch kommt es zu Lücken in den Messreihen.
Die ermittelten Tensionswerte dienen unter anderem als Steuergröße für die installierten Saugsondenanlagen. Laut Prasuhn et al. (2009) werden zur Untersuchung von Wasserinhaltsstoffen im Perkolat keramische Saugkerzen in den vier Tiefen eingesetzt; der dort angelegte Unterdruck wird aus den Messungen der aktuellen Saugspannungen im Boden übertragen.

2.2.3 Meteorologische Daten

Wetterdaten werden durch die 20 m entfernte amtliche Messstation erhoben (Prasuhn et al., 2011). Die Erfassung des Niederschlags mittels Hellman erfolgt in Intervallen von 10 Minuten.
Die aus den meteorologischen Messwerten ermittelte Grasreferenzverdunstung ET_0 nach Penman-Monteith liegt auf Stundenbasis vor. Eine derartige Referenzverdunstung erlaubt einen Vergleich der potentiellen Evapotranspiration zu verschiedenen Jahreszeiten und in unterschiedlichen Regionen (Allen et al., 1998).
Die Gleichung nach Penman (Allen et al., 1998) kombiniert die Energiebilanz mit dem Massentransfer und ist in der Lage, die Evaporation einer offenen Wasserfläche durch einfach messbare klimatologische Werte wie Sonnenschein, Temperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit zu ermitteln. Die Gleichung beinhaltet alle Parameter zur Bestimmung des Energieaustauschs und entsprechendem latenten Wärmefluss von gleichmäßiger Vegetationsausbreitung. Für einen bekannten Oberflächenwiderstand und aerodynamischen Widerstand lässt sich die Bestandesevapotranspiration direkt berechnen. Die Kombination der Gleichung nach Penman mit den Gleichungen für den aerodynamischen Widerstand r_a, sowie den Oberflächenwiderstand r_s ergibt die Gleichung nach Penman-Monteith (Allen et al., 1998):

$$ET0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \tag{1}$$

wobei

$ET0$ Referenz-Evapotranspiration [$\mathrm{mm\,d^{-1}}$],

R_n Nettostrahlung an der Bestandesoberfläche [$\mathrm{MJ\,m^{-2}\,d^{-1}}$],

G Dichte des Bodenwärmestroms [$\mathrm{MJ\,m^{-2}\,d^{-1}}$],

T mittlere Tagestemperatur in 2 m Höhe [°C],

u_2 Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m s^{-1}],

e_s Sättigungsdampfdruck [kPa],

e_a aktueller Dampfdruck [kPa],

$e_s - e_a$ Defizit des Sättigunsdampfdrucks [kPa],

Δ Neigung der Beziehung zwischen Sättigungsdampfdruck und Temperatur [kPa $°C^{-1}$],

γ Psychrometerkonstante [kPa $°C^{-1}$].

2.3 Datenaufbereitung

2.3.1 Ermittlung des Leaf Area Index

Der Leaf Area Index (LAI) ist laut Allen et al. (1998) definiert als die Fläche von Pflanzenblättern pro Fläche Boden [$m^2\,m^{-2}$]. Betrachtet wird dabei lediglich eine Seite des Pflanzenblattes. Der LAI ist stark abhängig von der Pflanzenart und dem Vegetationszeitpunkt: Er erreicht seinen größten Wert bei Beendigung des direkten Pflanzenwachstums und fällt danach wieder ab. Der Anstieg, sowie der maximale LAI und der spätere Abfall sind pflanzen-, bzw. blattspezifisch. Durch den LAI ist es möglich, die gemessene Evapotranspiration [$L\,T^{-1}$] in die beiden Komponenten Evaporation und Transpiration aufzuteilen (Abschnitt 2.3.4). Die verwendeten Daten für Mais und Weizen (Abbildung 5) wurden vom Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius Kühn-Instituts in Braunschweig gemessen und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Da der LAI nur an ausgewählten Tagen mit unregelmäßigem Abstand gemessen wurde, wurde ein Modell angepasst, sodass kontinuierliche Werte für den LAI zur Verfügung standen. Dafür wurde das Modell von Richter und Söndgerath (1990) verwendet, das im Anschluss an die Wachstumsphase zusätzlich Verluste von Biomasse zulässt:

$$\frac{dW}{dt} = r_w W f(t) - \mu W \tag{2}$$

mit der Anfangsbedingung $W(t = 0) = W(0) \geq 0$. Dabei ist W die Biomasse, r_w die Wachstums- und μ die Sterberate.
Die Funktion $f(t)$ beschreibt das zeitliche Verhalten des Modells, wobei gilt:

1. $f(t) \geq 0$
2. $\lim_{t\to\infty} f(t) = 0$.

In dem hier behandelten Fall wird f(t) ausgedrückt als

$$f(t) = \frac{\alpha_w Exp[-\rho_w t]}{1 + \alpha_w Exp[-\rho_w t]} \tag{3}$$

mit α_f und ρ_f als dimensionslose Fittingparameter. Die analytische Lösung des Anfangswertproblems aus Gleichung 2 lautet entsprechend

$$W(t) = \frac{W_0(1+\alpha_w)^{r_w/\rho_w} Exp[-\mu_w t]}{[1 + \alpha_w Exp[-\rho_w t]]^{r_w/\rho_w}}. \tag{4}$$

Die Anpassung des Modells an die Daten erfolgte mit dem Levenberg-Marquardt Algorithmus (Marquardt, 1963) in dem Programm MatLab. Tabelle 3 zeigt die ermittelten Parameter.

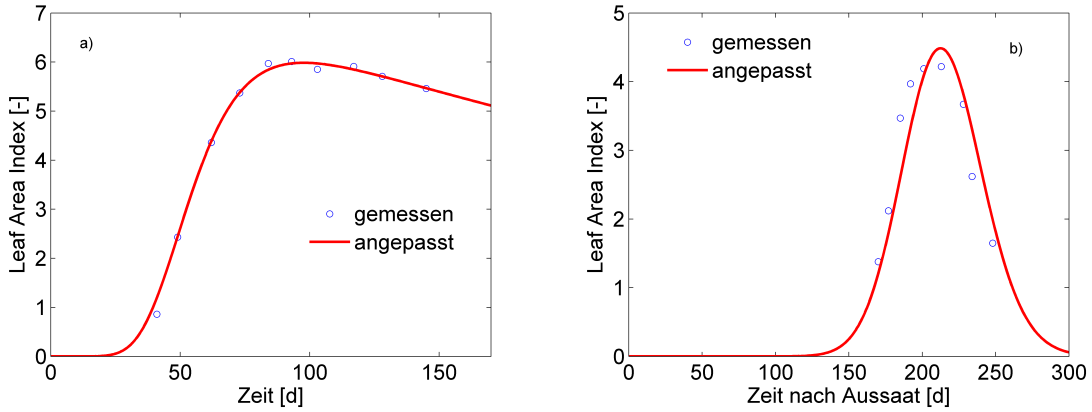

Abbildung 5: Leaf Area Index [-] für Mais (a) und Weizen (b).

Tabelle 3: Ermittelte Parameter für die Wachstumsfunktion des Leaf Area Indizes für Mais und Weizen.

Pflanze	W_0	α_w	r_w	ρ_w	μ_w
Mais	0	2,72	1,97	0,002	$1{,}25\,10^{-6}$
Weizen	0	698,07	0,10	$8{,}10\,10^{-5}$	0,01

2.3.2 Korrektur des Lysimetergewichts

Die Lysimeter der Forschungsstation Zürich-Reckenholz wurden mit unterschiedlichen, saisonabhängigen Kulturpflanzen bestellt. Auf den in dieser Arbeit untersuchten Lysi-

metern wurde in dem betrachteten Zeitraum Körnermais und Winterweizen angebaut. Tabelle 4 zeigt die zeitliche Abfolge der Kulturpflanzen, sowie deren Saat- und Erntetermine.

Tabelle 4: Bewirtschaftung der Lysimeter, Saat- und Erntetermine und die Vegetationsdauer für Körnermais und Winterweizen.

Kulturart	Aussaattermin	Erntetermin	Vegetationsdauer [d]
Körnermais	22.05.09	22.10.09	153
Winterweizen	31.10.09	19.07.10	261

Das Gewicht des Lysimeters wurde um das Gewicht der angepflanzten Kulturpflanzen korrigiert. Da hierfür keine direkten Messdaten vorlagen, wurde das Pflanzengewicht mittels einer Wachstumsfunktion angepasst. Das angewandte Modell entspricht dem Wachstumsmodell für Pflanzenblätter.

Tabelle 5: Über Veränderungen des Lysimetergewichts ermittelte Pflanzengewichte zum Erntezeitpunkt.

Lysimeter	Erntegewicht Mais [kg]	Erntegewicht Weizen [kg]
1	1,89	2,07
5	2,32	2,35
12	1,90	2,2

Entsprechend verfügt auch die Entwicklung des Pflanzengewichts mit der Zeit über einen Abfall am Ende der Vegetationsperiode. Dies lässt sich durch das Verwelken und Absterben der Blätter erklären. Als Anhaltspunkt für das Erntegewicht der Pflanzen wurde die vom Lysimeter verzeichnete Gewichtsreduzierung während der Ernte verwendet (Tabelle 5).

2.3.3 Niederschlag und Verdunstung

Die meteorologischen Daten der Wetterstation an der Lysimeteranlage geben einen groben Eindruck über die atmosphärischen Randbedingungen des Lysimeters. Für die Lösung der Wasserhaushaltsgleichung

$$ET_a = P + I - Q - \Delta S \tag{5}$$

mit ET_a = Evapotranspiration [mm], P = Niederschlag [mm], I = Bewässerung [mm], Q = Sickerwasserabfluss [mm] und ΔS = Änderung des gespeicherten Wassers. Laut Fank (2008) und Meissner et al. (2006) ist die hohe Genauigkeit der Lysimeterwägung von großer Bedeutung, da so auch der Einfluss von Tau-, Nebel- und Reifniederschlag erfasst werden kann. Bekannte Messunsicherheiten der Niederschlagsmessung mittels Standardmesseinrichtungen sind unter anderem die Messung mit kleiner Auffangfläche und der Windeinfluss bei Messung in 1 bis 2 m Höhe (Fank, 2008).
Durch die Änderung des Gewichts können der Niederschlag und die Verdunstung bestimmt werden, die das Lysimeter direkt betreffen. Dazu wird für jeden Zeitschritt das Anfangsgewicht vom Endgewicht abgezogen; von dieser Differenz wird das Sickerwasser desselben Zeitschritts abgezogen. Die Größe der daraus resultierenden Gewichtsdifferenz (hier Δ GW) gibt einen Aufschluss über die Dominanz des Niederschlags, bzw. der Verdunstung: Für $\Delta\ GW > 0$ ist die Änderung des Gewichts durch gefallenen Niederschlag zu erklären, für $\Delta\ GW < 0$ durch Verdunstung.
Abbildung 6 zeigt die Gewichtsveränderung unter Berücksichtigung des kumulativen Sickerwassers des Lysimeters 5 vom 26.04. - 28.04.09 und die daraus abgeleiteten Komponenten der Wasserbilanz.

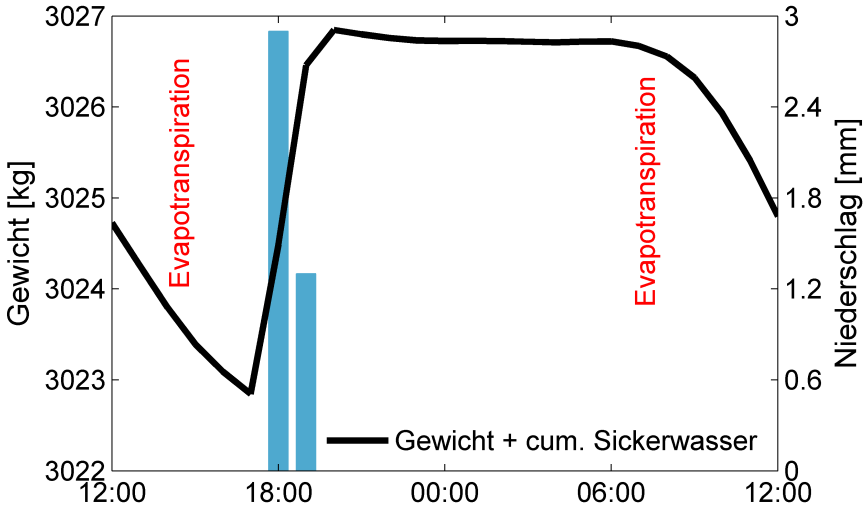

Abbildung 6: Gewichtsveränderung des Lysimeters 5 zwischen dem 26.04. und 28.04.09 bei vorheriger Berücksichtigung des kumulativen Sickerwassers. Gewichtsabnahmen werden der Verdunstung zugeteilt; Gewichtszunahmen resultieren aus auftreffendem Niederschlag.

Fank (2008) schlägt ein Aufzeichnungsintervall von 1 Minute vor, da dadurch garantiert ist, dass zu Zeiten mit Niederschlag die gleichzeitig stattfindende Verdunstung vernachlässigbar ist.
Die verwendeten Daten liegen als Aufzeichnungen in 5-Minutenintervallen vor; daraus aggregiert wurden Stundenwerte. Die Ermittlung von Evaporation und Niederschlag aus den Gewichtsänderungen des Lysimeters wurde für diese beiden Aufzeichnungsintervalle zunächst für einen Zeitraum von 6 Monaten durchgeführt und anschließend mit den gemessenen Daten der anliegenden Wetterstation verglichen. Die zeitliche Auflösung der Wetterstation beträgt 10 Minuten. Zusätzlich dazu wurden der Niederschlag und die Evapotranspiration in unterschiedlicher stündlicher Auflösung (1, 2, 4, 6 und 12 Stunden) aus der Wasserbilanz ermittelt. Die berechneten Daten wurden sowohl untereinander, als auch mit dem meteorologisch gemessenen Niederschlag auf Stundenbasis verglichen.

2.3.4 Aufteilung der Evapotranspiration

Die Modellierung des Wasserflusses mit Wurzelwasseraufnahme setzt die Aufteilung der berechneten Evapotranspiration in Evaporation und Transpiration voraus (Loos et al., 2006). Es gilt:

$$ETp = Ep + Tp \tag{6}$$

Die potentielle Evaporation Ep [mm d^{-1}] ist die Verdunstung von der unbewachsenen Bodenoberfläche, während die potentielle Transpiration Tp [mm d^{-1}] von den Pflanzen ausgeht. Die Aufteilung der Evapotranspiration in Evaporation und Transpiration wird über den Leaf Area Index realisiert. Dabei wird die Sonneneinstrahlung des gesamten Energiebudgets entsprechend der möglichen Interzeptionsrate aufgeteilt (Ritchie, 1972):

$$Ep = ETp\, Exp[-k\, LAI] \tag{7}$$

$$Tp = ETp\, (1 - Exp[-k\, LAI]) \tag{8}$$

Hierbei beschreibt k einen dimensionslosen Extinktionskoeffizienten der aufgefangenen Strahlung als Funktion des Sonnenwinkels, der Pflanzenverteilung und der Anordnung der Blätter. Simunek et al. (2009) geben für k Werte zwischen 0,50 und 0,75 an. Irmak & Mutiibwa (2008) ermittelten für Mais einen mittleren Extinktionskoeffizienten von 0,44 mit einer saisonabhängigen Variation von 0,12 bis 1,14. Ähnliche Werte (0,49 $\pm$ 0,03) fanden auch Lindquist et al. (2005). Für Winterweizen untersuchten Asgar et al. (1983) die Auswirkung unterschiedlicher Bewuchsdichten auf die Effizienz der Strahlungsener-

gie und der Wassernutzung. Sie kamen auf einen mittleren Wert von 0,703 für lockere Bewuchsdichten, 0,78 für mittlere Dichten und 0,82 für hohe Bewuchsdichten.
Verwendet wurde in dieser Arbeit ein Koeffizient von 0,46 für Mais und 0,78 für Weizen.

2.3.5 Wurzeltiefe

Das Verhältnis von Wurzeln zum oberirdischen Trieb einer Pflanze variiert stark zwischen verschiedenen Pflanzenarten und ist zudem von zahlreichen äußeren Faktoren abhängig. Dazu zählen beispielsweise bodenphysikalische Faktoren wie die Lagerungsdichte des Bodens, der Wassergehalt oder die Bodentemperatur (Marschner, 1995). Allerdings spielen auch die Nährstoffverfügbarkeit, sowie chemische und mikrobiologische Bedingungen eine wichtige Rolle. In trockenen Gebieten beispielsweise ist das Verhältnis von Wurzeln und Trieben deutlich höher als in temperierten Gebieten (Marschner, 1995). Gerade im Ackerbau hat die Menge des Düngers einen großen Einfluss auf die Entwicklung von oberirdischer und unterirdischer Biomasse und somit auch auf deren Verhältnis (Marschner, 1995). Der Einfachheit halber wurde in dieser Arbeit ein Verhältnis von 1:1 gewählt; dieses sagt aus, dass die unterirdischen Wurzeln demselben Wachstumsprozess und derselben -geschwindigkeit unterliegen wie die übrige oberirdische Biomasse. Demnach basierte auch die Ermittlung der Wurzeltiefe auf den Verläufen der Leaf Area Indizes. Der Unterschied hierbei war die Festlegung einer maximalen Wurzellänge, die im Gegensatz zum Leaf Area Index nicht wieder abnimmt, sondern bis zur Ernte auf diesem Wert verbleibt. Für Mais wurde eine maximale Wurzellänge von 50 cm angenommen, für Weizen von 70 cm.

2.4 Numerisches Modell

2.4.1 Ungesättigter Wasserfluss

Die Wasserdynamik in dem System Boden-Pflanze-Atmosphäre wurde mit der Richards-Gleichung beschrieben. Diese verknüpft das Gesetz von Darcy (Gleichung 9), nach dem der Wasserfluss q [cm d^{-1}] in gesättigten porösen Medien als Verknüpfung der hydraulischen Leitfähigkeit K [cm d^{-1}] und dem hydraulischen Gradienten ermittelt werden kann, mit dem Massenerhaltungsgesetz (Gleichung 10).

$$q = -K(\theta)\frac{\delta H}{\delta z} \tag{9}$$

$$q_{in} = q_{out} + \Delta S \tag{10}$$

Entsprechend gilt

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = -\frac{\delta q}{\delta z}. \tag{11}$$

Für den eindimensionalen Wasserfluss lautet die Richards-Gleichung

$$\frac{\delta\theta(h)}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z}[K(h)(\frac{\delta h}{\delta z} + 1)] - S(z,h). \tag{12}$$

Bei zusätzlicher Betrachtung der Wurzelwasseraufnahme wird die Gleichung durch einen Senkenterm erweitert. $\theta(h)$ ist die Retentionsfunktion, also der Wassergehalt [$\mathrm{cm}^3\,\mathrm{cm}^{-3}$] in Abhängigkeit des Matrixpotentials h [cm], t steht für die Zeit [d], z ist die vertikale Raumkoordinate (positiv nach oben mit z = 0 am unteren Rand des Simulationsgebietes) und $K(h)$ [$\mathrm{cm\,d}^{-1}$] ist die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Der Senkenterm $S(z,h)$ [d^{-1}] ist sowohl von der Tiefe, als auch vom Matrixpotential abhängig und beschreibt ein bestimmtes Volumen an Wasser, das in einer bestimmten Zeit aus einem bestimmten Volumen Boden gezogen wird.
Die Beziehungen zwischen h und θ, bzw. θ und K sind stark nicht-linear, sodass in den meisten Fällen nur numerische Lösungen möglich sind (Hillel, 1998). Zur numerischen Lösung der Richards-Gleichung wurde HYDRUS-1D verwendet.
Die Lösung der Richards-Gleichung erfordert unter anderem die Ableitung der Retentionsfunktion und der hydraulischen Leitfähigkeit. Die wohl am häufigsten verwendete Parametrisierung der hydraulischen Eigenschaften ist die nach van Genuchten (1980). Demnach kann die effektive Sättigung S_e [-] ausgedrückt werden als

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^{(1-\frac{1}{n})}}, \tag{13}$$

mit θ_r als Restwassergehalt und θ_s als Sättingungswassergehalt. Der Parameter α [cm^{-1}] beschreibt den Kehrwert des Lufteintrittspunkts und n [-] ist ein Maß für die Porengrößenverteilung (van Genuchten, 1980).
Die hydraulische Leitfähigkeit K wird von Mualem (1976) beschrieben, unter der Annahme, dass der Boden als zwei Bündel von Kapillaren gesehen werden kann.

$$K(S_e) = K_s S_e^{\tau} \frac{[\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)}]^2}{[\int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)}]^2}. \tag{14}$$

K_s ist die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [$\mathrm{cm\,d}^{-1}$], τ ist ein dimensionsloser Parameter zur Porenkonnektivität. $h(S_e)$ stellt die Beziehung des Matrixpotentials und der

effektiven Sättigung innerhalb der Retentionskurve dar. Mualem schließt damit an das Modell von Burdine (1953) an, der den Boden als ein Bündel von Kapillaren unterschiedlicher Radien beschreibt.
Die analytische Lösung für die Kombination der Gleichungen 13 und 14 lautet (van Genuchten, 1980)

$$K(S_e) = K_s S_e^{\tau}[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{1-\frac{1}{n}}})^{1-\frac{1}{n}}]^2. \tag{15}$$

Der Porenparameter τ wurde von Mualem (1976) anhand einer gewissen Anzahl ungestörter und gestörter Bodenproben auf den Wert 0,5 als Mittel für die meisten Böden geschätzt.
Für die Beschreibung der bodenhydraulischen Eigenschaften ist die Kenntnis der Parameter θ_r, θ_s, α, n und K_s notwendig.

2.4.2 Wurzelwasseraufnahme

Bei Anwesenheit von Pflanzen ist davon auszugehen, dass der größte Teil der stattfindenden Verdunstung der Transpiration zuzuschreiben ist. Die tatsächliche Transpiration kann als Antrieb der Wurzelwasseraufnahme gesehen werden. Radcliff & Simunek (2010) nennen die Öffnung der Blattstomata als zuständige Größe für die Steuerung des Wasserflusses. Bei teilweise geschlossenen Stomataöffnungen fällt demnach die Transpiration unter die potentielle Transpiration; für vollständig geschlossene Stomata findet keine Transpiration statt (ET = 0). Feddes et al. (1978) definierten die Wurzelwasseraufnahme als von einer dimensionslosen Wasserstressfunktion $\omega(h)$ abhängige potentielle Wasseraufnahmerate $S_p(z)$ [d^{-1}]:

$$S(z,h) = \omega(h) \cdot S_p(z) \cdot T_p. \tag{16}$$

Dabei gilt $0 \leq \omega \leq 1$. Eine Wasseraufnahme durch Wurzeln ist laut Feddes et al. (1978) nur in einem bestimmten Matrixpotentialbereich möglich (Abbildung 7). Die Wasserstressfunktion ω wird über vier spezifische Matrixpotentiale definiert (h_1, h_2, h_3 und h_4):

$$\alpha(h) = \begin{cases} 0 & h > h_1 \\ (h_1 - h)(h_2 - h_1)^{-1} & h_1 < h < h_2 \\ 1 & h_2 < h < h_3 \\ 1 - (h_3 - h)(h_4 - h_3)^{-1} & \\ 0 & h < h_4 \end{cases} \tag{17}$$

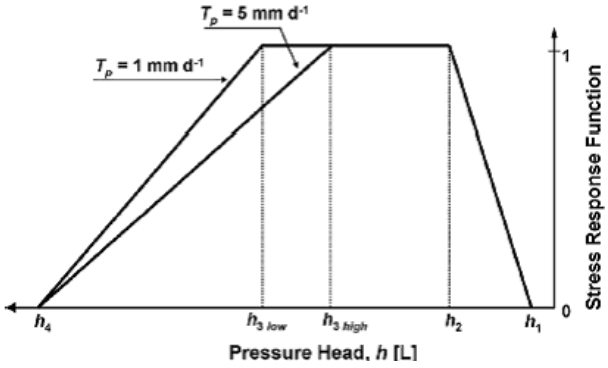

Abbildung 7: Wasserstressfunktion ω [-] bei unterschiedlichen Raten der potentiellen Transpiration T_p (nach Feddes et al., 1978 aus Simunek & Hopmans, 2009, verändert).

Tabelle 6: Parameter für die Wasserstressfunktion für Mais und Weizen nach Wesseling (1991).

Parameter	Mais	Weizen	Modell
h_1	0	-15	-7,5
h_2	-1	-30	-15
$h_{3\,high}$	-500	-325	-413
$h_{3\,low}$	-900	-600	-750
h_4	-16.000	-8.000	-12.000
$T_{p\,high}$	0,5	0,5	0,5
$T_{p\,low}$	0,1	0,1	0,1

Es wird davon ausgegangen, dass nahe Sättigung ($h > h_1$) und unterhalb des permanenten Welkepunkts PWP ($h < h_4$) keine Transpiration und demnach auch keine Wurzelwasseraufnahme stattfindet. Optimale Bedingungen herrschen zwischen h_2 und h_3. Außerhalb dieses Bereichs wird eine lineare Ab-, bzw. Zunahme von ω mit dem Matrixpotential angenommen.

HYDRUS-1D bietet die Möglichkeit, für die Wasserstressfunktion ω nach Feddes et al. (1976) entsprechende Parameter der Wurzelwasseraufnahme für verschienene Pflanzenarten auszuwählen.

Die Unterscheidung zwischen $h_{3\,high}$ und $h_{3\,low}$ liegt der Annahme verschiedener Transpirationsraten $T_{p\,high}$ und $T_{p\,low}$ zugrunde (siehe auch Abbildung 7).

Die Parametrisierung der Wasserstressfunktion für Mais und Weizen (Tabelle 6) erfolgte nach Wesseling (1991). Da für jede Simulation lediglich eine Kulturart ausgewählt

werden kann, wurden jeweils die gerundeten Mittelwerte von Mais und Weizen für die Gesamtsimulationen verwendet (Tabelle 6). Zusätzlich dazu wurden Szenarien für die einzelnen Vegetationsperioden mit den entsprechenden Feddes-Parametern gerechnet.

2.4.3 Anfangs- und Randbedingungen

Zur Lösung der Richardsgleichung sind geeignete Anfangs- und Randbedingungen erforderlich. Für die Simulation wurde die Anfangsbedingung über Matrixpotentiale h_i [cm] angegeben (Simunek et al., 2009):

$$h(z, t = 0) = h_i(z). \tag{18}$$

Das Problem der korrekten Anfangsbedingung bezüglich der Tiefenverteilung der Matrixpotentiale im Bodenkörper wurde über eine Vorsimulation umgangen. Dafür wurden Daten über Niederschlag und Evapotranspiration der Wetterstation Zürich-Reckenholz verwendet. Die Vorsimulation umfasste einen Zeitraum von 6 Monaten. Zu Beginn wurde ein Matrixpotential von -100 hPa im gesamten Bodenkörper angesetzt. Am Ende dieses Vorlaufs wurde das bis dahin verzeichnete kumulative Sickerwasser auf 0 gesetzt, um die Ergebnisse der Simulation mit den gemessenen Daten vergleichen zu können. In der Zielfunktion wurden ebenfalls Daten erst ab diesem Zeitpunkt verwendet.
Am oberen Rand des Lysimeters wurden atmosphärische Randbedingungen angelegt, bei denen auf die Schnittstelle Boden-Luft besonderer Wert gelegt wird. Laut Simunek et al. (2009) wird der Fluss über diese Schnittstelle ausschliesslich über externe Bedingungen gesteuert. HYDRUS-1D stellt diese Bedingung durch eine Annahme von Neumann et al. (1974) zur Verfügung. Dementsprechend wird der Fluss am oberen Rand limitiert durch die Gleichungen

$$\left| -K(h)(\frac{\delta h}{\delta z} + 1) \right| \leq I \tag{19}$$

und

$$h_a \leq h \leq h_e. \tag{20}$$

I [cm d^{-1}] ist die maximale potentielle Infiltrations- und Evaporationsrate unter aktuellen atmosphärischen Bedingungen, h_a und h_e sind die maximal, bzw. minimal erlaubten Matrixpotentiale. Der genaue Wert von h_a hängt laut Radcliff & Simunek (2010) von den Gleichgewichtsbedingungen zwischen Bodenwasser und Wasserdampf in der Atmosphäre ab. Sobald dieser Wert überschritten ist, wird auf eine Dirichlet-Randbedingung umgeschaltet, und der Fluss über den oberen Rand verkleinert. Es wurde ein maximales

Matrixpotential von 100.000 cm zugelassen. Für $h_s = 0$ kommt es zu einem sofortigen Oberflächenabfluss des nicht infiltrierten Wassers. Bei positiven Werten kann eine Akkumulation des überschüssigen Wassers herbeigeführt werden; dazu muss der Wert von h_s aus der Differenz des Niederschlags und der Infiltration berechnet werden. Entsprechend der jeweiligen atmosphärischen Bedingung nimmt dieser Wert bei starkem Niederschlag zu und wird bei hoher Infiltration oder Verdunstung reduziert. Es wurde eine Akkumulation von maximal 5 cm erlaubt.
Die Beschreibung des Sickerwassers am unteren Rand des Lysimeters erfolgt über eine Seepage Face-Randbedingung. Diese Bedingung sagt aus, dass der Fluss über den unteren Rand null ist solange das Matrixpotential negativ ist. Bei Sättigung wird das Matrixpotential am unteren Rand gleich null gesetzt. Der Fluss q [cm d^{-1}] über diesen Rand berechnet sich wie folgt:

$$q(t, z = 0) = \begin{cases} 0 & h(t, z = 0) < 0 \\ K(h)(\frac{\delta h}{\delta z} - 1) & h(t, z = 0) \geq 0 \end{cases}. \tag{21}$$

2.5 Ermittlung bodenhydraulischer Eigenschaften

Für die Simulation wurde lediglich der gewachsene Boden ohne die Sand-Kies-Schicht betrachtet, was zu einer Profillänge von 135 cm führt. Schelle et al. (2012) fanden heraus, dass wenn bei der inversen Simulation nur Daten des kumulativen Sickerwassers und profilgemittelten Wassergehalts in der Zielfunktion verwendet werden, jedoch keine Matrixpotentialdaten, eindeutige hydraulische Eigenschaften nur für homogene Profile bestimmt werden können. Zusätzliche Tensionsdaten verbessern demnach die Genauigkeit der geschätzten Parameter deutlich und sind bei geschichteten Profilen ausschlaggebend für die eindeutige Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften. Entsprechend wurde das Profil in dieser Arbeit auf einen Horizont reduziert, das bedeutet, es wurden effektive hydraulische Eigenschaften bestimmt.
Für die Ermittlung der bodenhydraulischen Eigenschaften wurden drei Verfahren herangezogen und verglichen. Diese sind in den folgenden drei Abschnitten genauer erläutert.

2.5.1 Pedotransferfunktion

Bei Pedotransferfunktionen handelt es sich um Rechenmodelle, die mit Hilfe bekannter und einfach zu bestimmender bodenyphysikalischer Merkmale (z.B. Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte oder bekannte Punkte auf der Retentionskurve) eine rechnerische Abschätzung der gewünschten bodenhydraulischen Kennwerte ermöglichen (Hangen &

Scherzer, 2004). Für die vorliegenden Böden wurden Informationen über die Bodentextur (%-Anteile von Sand, Schluff und Ton), sowie die Lagerungsdichte verwendet. Dabei wurden die Informationen der einzelnen Horizonte über das ganze Profil gemittelt (Tabelle 7).
Die bodenhydraulischen Eigenschaften wurden mit dem Programm Rosetta Lite von Schaap et al. (2001) ermittelt. Rosetta Lite beinhaltet fünf Modelle, die entsprechend der eingegebenen Informationen über zahlreiche Pedotransferfunktionen Parameter der Retentionsfunktion, sowie die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit bestimmen. Das Programm ist in HYDRUS-1D implementiert.

Tabelle 7: Eingabeparameter für die Pedotransferfunktion Rosetta Lite (Schaap et al., 2001).

Boden aus ...	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	ρ_b [$\mathrm{g\,cm^{-3}}$]
Grafenried	55,75	24,76	17,50	1,53
Reckenholz	21,50	53,83	24,66	1,45
Schafisheim	52,20	24,40	23,40	1,50

2.5.2 In situ-Bestimmung

Die Gegenüberstellung der gemessenen Wassergehalte und Matrixpotentiale desselben Zeitabschnitts liefert die Retentionskurve. Über die Anpassung von Retentionsmodellen ist es möglich, eine Vorstellung der bodenhydraulischen Kennwerte zu bekommen.
An die korrigierten Retentionsdaten der Tiefen 30, 60 und 90 cm wurde mit Hilfe des Programms HYPROP (Pertassek et al., 2011) das Retentionsmodell nach van Genuchten angepasst. Im Rahmen der Optimierung werden dabei die bodenhydraulischen Parameter über Minimierung der Summe der kleinsten Quadrate geschätzt. Dieses geschieht mit einer Kombination aus dem Levenberg-Marquardt Algorithmus und dem Shuffled Complex Evolution Algorithmus (Peters & Durner, 2008). Dadurch ist es möglich, Retentionsdaten anhand der gemessenen Daten zu ermitteln.
Aufgrund fehlender Informationen bei pF-Werten größer 2,7 wurden über Rosetta Lite aus der bekannten Korngrößenverteilung und der Lagerungsdichte zusätzliche Retentionspunkte bei pF 3,5 und 4 generiert.
Die bodenhydraulischen Eigenschaften, die durch die Anpassung an die Retentionsdaten ermittelt wurden, dienten auch als Ausgangswerte für die inverse Modellierung.

2.5.3 Inverse Modellierung

Die inverse Modellierung basiert auf der Minimierung einer Zielfunktion, welche die Unterschiede zwischen gemessenen und berechnete Werten aufzeigt. Die Optimierung der gewünschten Parameter erfolgt dabei über die Minimierung der Zielfunktion

$$\Psi(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^{x_i} w_i \sum_{j=1}^{x_j} (r_{ij}(\mathbf{p}))^2. \tag{22}$$

$\mathbf{p}$ steht für den zu optimierenden Parametervektor, r_{ij} sind die Residuen, also die Differenzen zwischen gemessenen und simulierten Werten zu den einzelnen Messzeitpunkten j. x_i gibt die Anzahl der verschiedenen Datengruppen an, in diesem Fall die Messparameter (Matrixpotential, kumulatives Sickerwasser und mittlerer Wassergehalt) in unterschiedlichen Tiefen. w_i ist der Wichtungsfaktor der Residuen der jeweiligen Datengruppe. Die Wichtungen der Messparameter sind in Tabelle 8 angegeben.

Tabelle 8: Messungenauigkeiten und Wichtungen der Parameter innerhalb der Zielfunktion. n.b. = nicht bekannt.

Parameter	Messungenauigkeit	Wichtung
Matrixpotentiale	3 hPa	$1 \cdot 10^{-5}$
kumulatives Sickerwasser	n.b.	1
mittlerer Wassergehalt	10 g	$1 \cdot 10^{3}$

Die Messungenauigkeit der Kippwaagen für das Sickerwasser ist nicht bekannt. Der mittlere Wassergehalt des Lysimeters wurde auf Basis der Gewichtsveränderungen bestimmt. Dazu wurde vom Wassergehalt zu Beginn des betrachteten Zeitraums ausgegangen; dieser Ausgangswassergehalt wurde über die Messungen der Bodensensoren in den vier Tiefen bestimmt. Über die Veränderung des Gewichts konnte dadurch eine Abschätzung des Wassergehalts innerhalb des Lysimeters gemacht werden. Dieser Wassergehalt bezieht sich entsprechend auf das gesamte Bodenprofil.
Loague & Green (1991) bezeichnen ein Modell nur dann als gut, wenn es in der Lage ist, ein beobachtbares Phänomen in einem vorgegebenen Rahmen und mit akzeptabler Genauigkeit vorherzusagen. Die Überprüfung der Eignung der verwendeten Modelle wurde anhand des Root Mean Square Errors RMSE durchgeführt. Dieser Wert betrachtet die aufsummierten Abweichungen der gemessenen von den beobachteten Daten für jede

Datengruppe:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} (P_i - O_i)^2}{m}}. \quad (23)$$

O steht für die beobachteten, P für die vom Modell vorhergesagten Daten; m ist die Datenanzahl.

Die Unsicherheiten der geschätzen Parameter wurden nach der *First Order Second Moment Methode* ($FOSM$) bestimmt. Dabei werden lediglich die ersten beiden statistischen Momente Mittelwert und Standardabweichung betrachtet (Kunstmann et al., 2002). Kunstmann et al. (2002) beschreiben diese Methode als vorteilhaft bezogen auf die Berechnungsgeschwindigkeit, sofern die Größe der Kovarianz in einem überschaubaren Rahmen bleibt und die Unsicherheit moderat ist, da die Methode inhärent linear ist.

Die Minimierung der Zielfunktion erfolgte durch den *Shuffled Complex Evolution Algorithmus* der *University of Arizona* ($SCE-UA$) nach Duan et al. (1993). Dieser globale evolutionäre Optimierungsalgorithmus ist in der Hydrologie sehr weit verbreitet und wird als effektiv und effizient im Hinblick auf Problembereiche der globalen Optimierung beschrieben. Er hat bereits Anwendung in zahlreichen Arbeiten gefunden, zum Beispiel Jansen (2005), Iden & Durner (2007), Durner et al. (2008), und Schelle et al. (2010, 2011 und 2012).

Die Ermittlung der bodenhydraulischen Eigenschaften durch die inverse Simulation erfolgte zum einen nach dem van Genuchten-Mualem-Modell, zum anderen wurde der sogenannte Free-Form Algorithmus (Iden & Durner, 2007) verwendet. Bei diesem Algorithmus wird keine feste Form der Retentions- und Leitfähigkeitskurve vorausgesetzt, wodurch eine höhere Flexibilität bezüglich der bodenhydraulischen Eigenschaften gegeben ist (Schelle et al., 2011). Lediglich eine Monotonie von θ und K_s wird festgelegt. Durch eine mehrstufige Routine werden Knotenpunkte auf der Matrixpotential-Achse erstellt; an diesen wird dann durch inverse Modellierung der Wert auf der Retentions-, bzw. Leitfähigkeitskurve bestimmt. Beide Kurven werden unabhängig voneinander geschätzt, wodurch die Gefahr eines Modellfehlers minimiert wird.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Tensionen und Bodenfeuchte

Die eingesetzten Tensiometer und Wasserspannungssensoren verfügen über einen Messbereich von 0 bis -15.000 hPa (Equitensiometer), bzw. 0 bis -850 hPa. Bei Über- oder Unterschreitung dieses Messbereichs sind die Daten als nicht verwertbar anzusehen und können demnach aussortiert werden.
Aufgrund der anzunehmenden Heterogenität innerhalb des Bodenmonolithen ist es nicht verwunderlich, dass die Messungen der zwei Sensoren des gleichen Typs in einer Tiefe stellenweise voneineinander abweichen.
In den Abbildungen 8 und 9 sind die Verläufe der stündlichen Daten der FDR-Sensoren in den unterschiedlichen Tiefen exemplarisch für das Lysimeter 5 für den Zeitraum vom 01.04.09 bis 01.09.10 dargestellt.
Farbig markiert sind zudem wichtige Eingriffe, die während dieser Zeit an den Lysimetern, dem Boden oder den Kulturpflanzen vorgenommen wurden (Tabelle 9). Während

Tabelle 9: Termine der zusätzlichen Eingriffe an den Lysimetern im Rahmen der Bewirtschaftung.

Termin	Eingriff
11.05.09	Revision der Lysimeteranlage
19./20.05.09	Hacken/Eggen
21.05.09	Wiedereinbau Sonden in 10 cm Tiefe
22.05.09	Saat Körnermais
05.06.09	Hacken Körnermais
22.10.09	Ernte Körnermais
27.10.09	Bodenbearbeitung
31.10.09	Saat Winterweizen
03./04.11.09	Wiederbefüllung der Tensiometer
19.07.10	Ernte Winterweizen
03.08.10	Ausbringung Stroh Winterweizen
23.08.10	Bodenbearbeitung

des gesamten Zeitraums liegt der von Sensor 1 gemessene Wassergehalt oberhalb des von Sensor 2 gemessenen Wassergehalts; dies kann zum einen an der Heterogenität des Bodens liegen, zum anderen kann es sich aber auch um einen Kalibrierfehler handeln. Auffällig ist, dass in den Tiefen 30, 60 und 90 cm die Messdaten während der Wintermonate einen engeren Verlauf zeigen, als während der Sommer- und Herbstmonate.

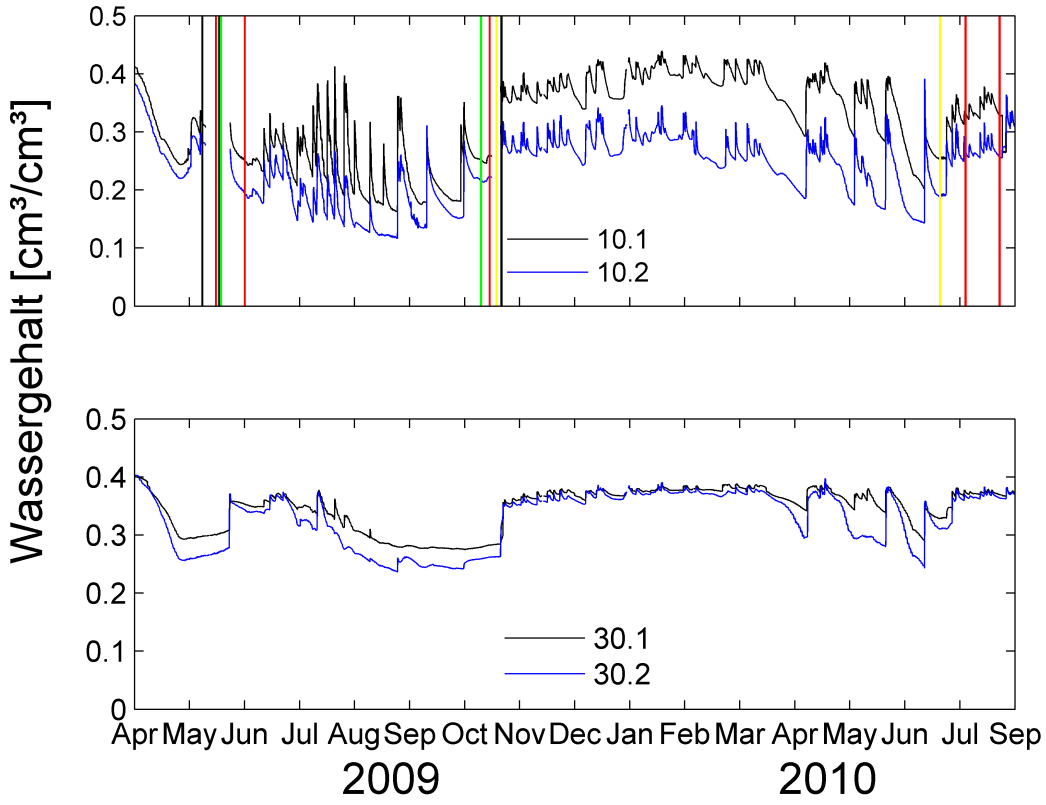

Abbildung 8: Stündliche Daten der FDR-Messungen in 10 und 30 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10. Zusätzliche Markierung der Eingriffe am Lysimeter (schwarz), Bodenbearbeitung (rot) und Pflanzenaussaat oder -ernte (grün: Körnermais, gelb: Winterweizen) für Lysimeter 5.

Insgesamt zeigen die Messdaten in größeren Tiefen einen deutlich ruhigeren und zueinander ähnlicheren Verlauf. In 90 cm Tiefe (Abbildung 8) zeigt der Sensor 2 einen deutlichen Abfall des gemessenen Wassergehalts von August bis Ende November. Dieser Verlauf ist in den anderen Tiefen nur tendenziell zu erkennen. Ein Einfluss der Vegetation, bzw. der Maisernte und Weizenaussaat kann daher ausgeschlossen werden. Ein Kalibrierfehler ist hier schwer auszumachen, da keiner der Sensoren in dem Zeitraum oder kurz davor ausgefallen ist. Obwohl der Boden des Lysimeters 5 (Reckenholz) sehr skelettarm und lehmig ist, kann der zunehmende Einfluss der räumlichen Heterogenität des Bodens in dieser Tiefe nicht ausgeschlossen werden.
Eine Hochskalierung auf Tageswerte zeigt im oberen Horizont einen Verlauf, der demjenigen in Stundenauflösung stark ähnelt (Abbildung 27 im Anhang). Die Betrachtung hochskalierter Werte ist für die spätere Simulation von Bedeutung, da diese aufgrund

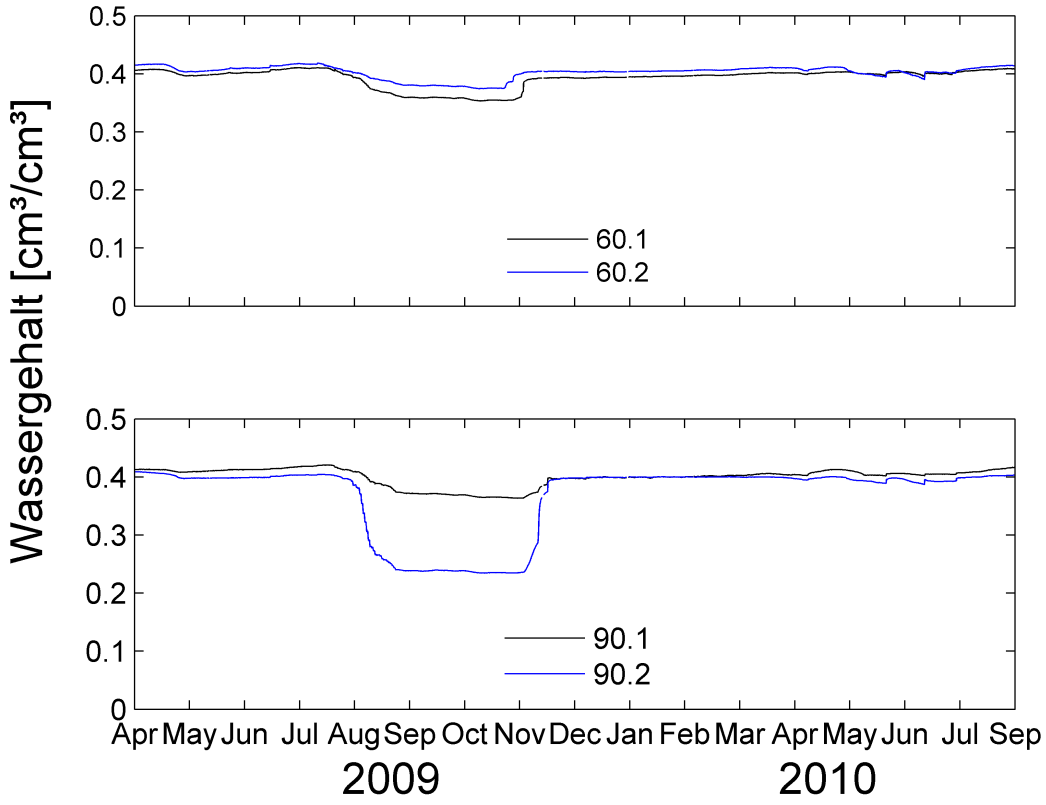

Abbildung 9: Stündliche Daten der FDR-Messungen in 60 und 90 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10.

des langen Zeitraums auf Tageswerten basiert.

Die stündlichen Verläufe der Tensiometer zeigen vor allem für das Equitensiometer in 10 cm Tiefe sensiblere Reaktionen bezüglich Veränderungen der Bodenwasserspannung, jedoch auch häufigere Störungen und Ausfälle (Abbildung 10). Gezeigt werden hier lediglich die Stundenwerte der Tiefen 10 (Equitensiometer) und 30 cm (Drucktensiometer). Die Daten der anderen Tiefen, sowie die Tageswerte sind im Anhang zu finden.

Gleich zu Beginn der Messungen zeigt einer der Sensoren in 10 cm Tiefe eine Austrocknung auf unter -15.000 hPa an. Da damit die Messgrenze überschritten ist, kann der darauffolgende Anstieg der Wasserspannung nicht als eindeutiges Messergebnis angesehen werden. In 30 cm Tiefe zeigen beide Tensiometer eine ähnliche Austrocknung und überschreiten ebenfalls ihre Messgrenze von -850 hPa, was sich direkt in einem Ausfall beider Sensoren wiederspiegelt.

Wie bereits erwähnt müssen die Drucktensiometer, anders als die Equitensiometer, nach einem Ausfall von Hand wiederbefüllt werden. Nach der Revision der Lysimeteranlage

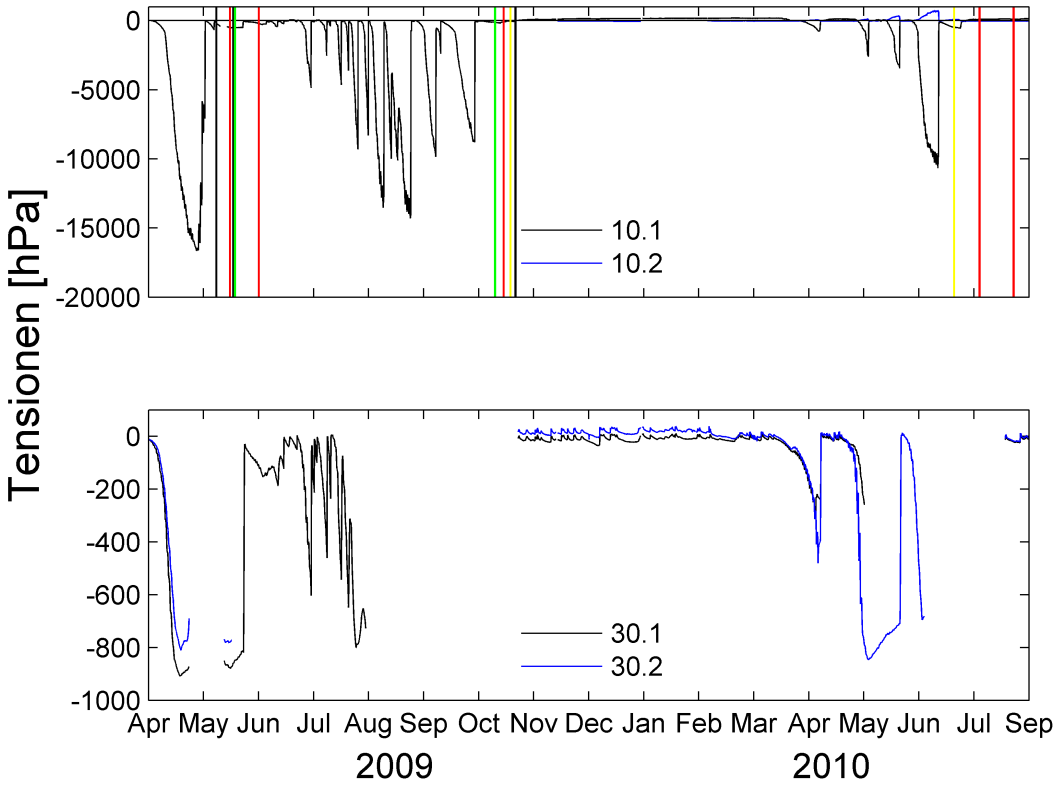

Abbildung 10: Stündliche Daten der Tensionsmessungen in 10 und 30 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10.

am 11.05.2009 konnten die Tensiometer zwar wieder in Betrieb genommen werden, erreichten jedoch direkt wieder ihre Messgrenze. Der Abfall der Wasserspannung ist sehr rapide, zeigt sich aber in ähnlicher Art und Weise auch in den tieferliegenden Messungen in 60 und 90 cm Tiefe (Abbildung 28 im Anhang). Die Messungen der Tensiometer sind alles in allem sehr unkonstant, da in den meisten Fällen nur einer der beiden Sensoren aktiv gemessen hat. Während der Vegetationszeit des Körnermais lieferte lediglich ein Equitensiometer dauerhaft Messungen, die anderen Tensiometer in größeren Tiefen fielen kurz nacheinander aus. Nach der Wiederbefüllung am 03. und 04.11.2009 jedoch wiesen die Tensiometer in 60 und 90 cm keinerlei Ausfälle auf. Eher auffällig ist die Aufzeichnung positiver Messwerte durch mindestens ein Tensiometer. Das ist auf die feuchteren Bodenverhältnisse zurückzuführen: Bei einem hohen Wassergehalt des Bodens nahe der Sättigung wirkt ein entsprechend hoher Druck auf die Tensiometerkerzen. Die dadurch gemessenen leicht positiven Werte entstehen durch diesen Überdruck. Ein Vergleich mit den Wassergehaltsdaten bestätigt, dass der Boden in diesem Zeitraum sehr feucht war,

sodass die Sensoren positive Wasserspannungen verzeichneten. Für das Equitensiometer wurden Messwerte bis 50 hPa akzeptiert, für die Tensiometer bis 10 hPa.
Die Gegenüberstellung der Wassergehalts- und Tensionsmessungen ergibt die Retentionskurve. Hierfür wurden die gemittelten Wassergehalte gegen die gemittelten Matrixpotentiale, ausgedrückt als pF-Wert ($\log_{10}$(-Matrixpotential [hPa]), in derselben Tiefe aufgetragen. Abbildung 11 zeigt die Retentionskurven für die Lysimeter 1, 5 und 12.

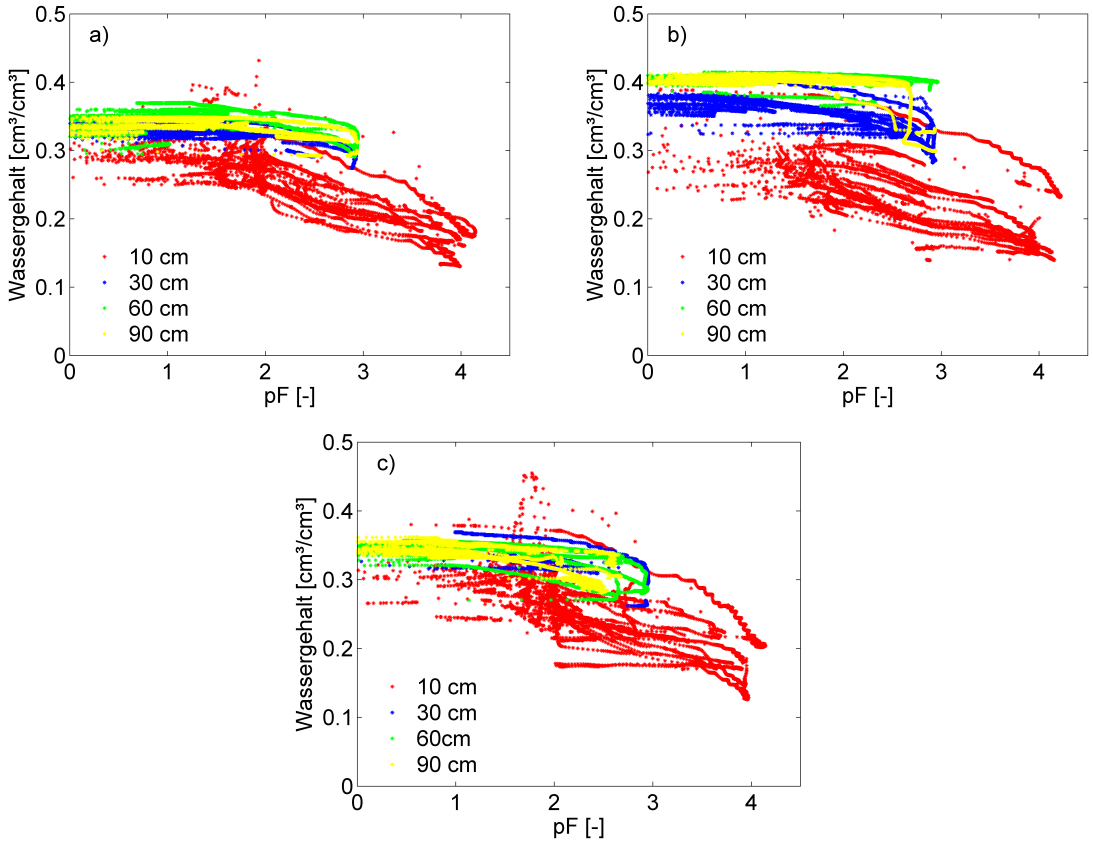

Abbildung 11: Retentionskurven der Rohdaten in den 4 Tiefen 10, 30, 60 und 90 cm der Lysimeter 1 (a), 5 (b) und 12 (c).

Die starke Streuung der Daten lässt vermuten, dass es große Unterschiede zwischen den Sensoren in gleicher Tiefe hinsichtlich der Reaktionen gibt. Zusätzlich dazu können Hystereseeffekte nicht ausgeschlossen werden. Um die Übereinstimmungen der Wassergehalts- und Wasserspannungsmessungen näher zu untersuchen, wurden die gemittelten Messdaten in der jeweiligen Tiefe verglichen (Abbildung 12). Die Verläufe der Wassergehalts- und Wasserspannungsdaten auf Stundenbasis zeigen tendenziell dieselben Reaktionen auf Veränderungen der Bodenfeuchte. Ein Anstieg des Wassergehalts geht unweigerlich mit einem Anstieg des Matrixpotentials (hier ausgedrückt als pF-Wert) einher. Es fällt

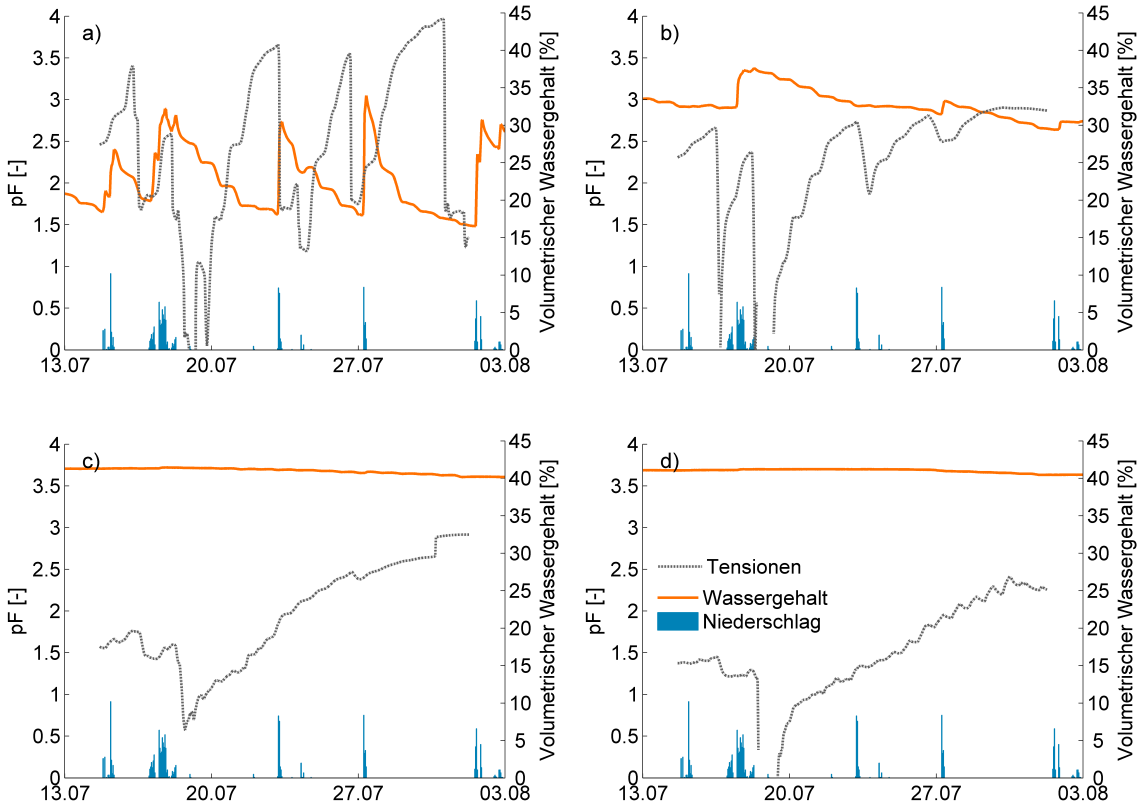

Abbildung 12: Gegenüberstellung der Wassergehalts- und Tensionsdaten in den Tiefen 10 (a), 30 (b), 60 (c) und 90 cm (d) für den Zeitraum 13.07 - 03.08.09 auf Stundenbasis und entsprechende Niederschlagsdaten.

auf, dass die Tensiometer generell eine raschere Reaktion auf Niederschlagsereignisse zeigen. Dieses fällt im Speziellen in den Tiefen 60 und 90 cm auf: Während die Tensiometer immer noch mit steigenden Wasserspannungen (sinkender pF-Wert) auf die Niederschläge reagieren, zeigen die FDR-Sensoren nahezu keine Veränderung hinsichtlich des gemessenen Wassergehalts.

Aufgrund der starken Streuungen der Daten wurde der gesamte Datensatz um Ausreißer korrigiert. Dabei wurde vor allem auf Ausfälle der Sensoren und die danach eventuell fehlerhaften Messungen geachtet. Zusätzlich wurde die Glaubwürdigkeit der Messgrenzen in Frage gestellt, sodass für das Equitensiometer ein maximaler pF von 3,7 gesetzt wurde; für die Drucktensiometer galten alle Werte größer pF 2,7 als nicht verwertbar. Die korrigierten Retentionskurven sind im Anhang zu finden (Abbildung 31). Die Anpassungen an die korrigierten Retentionskurven zeigt Abbildung 13.

Verwendet wurde das Modell von van Genuchten-Mualem. Es fällt auf, dass die Anpas-

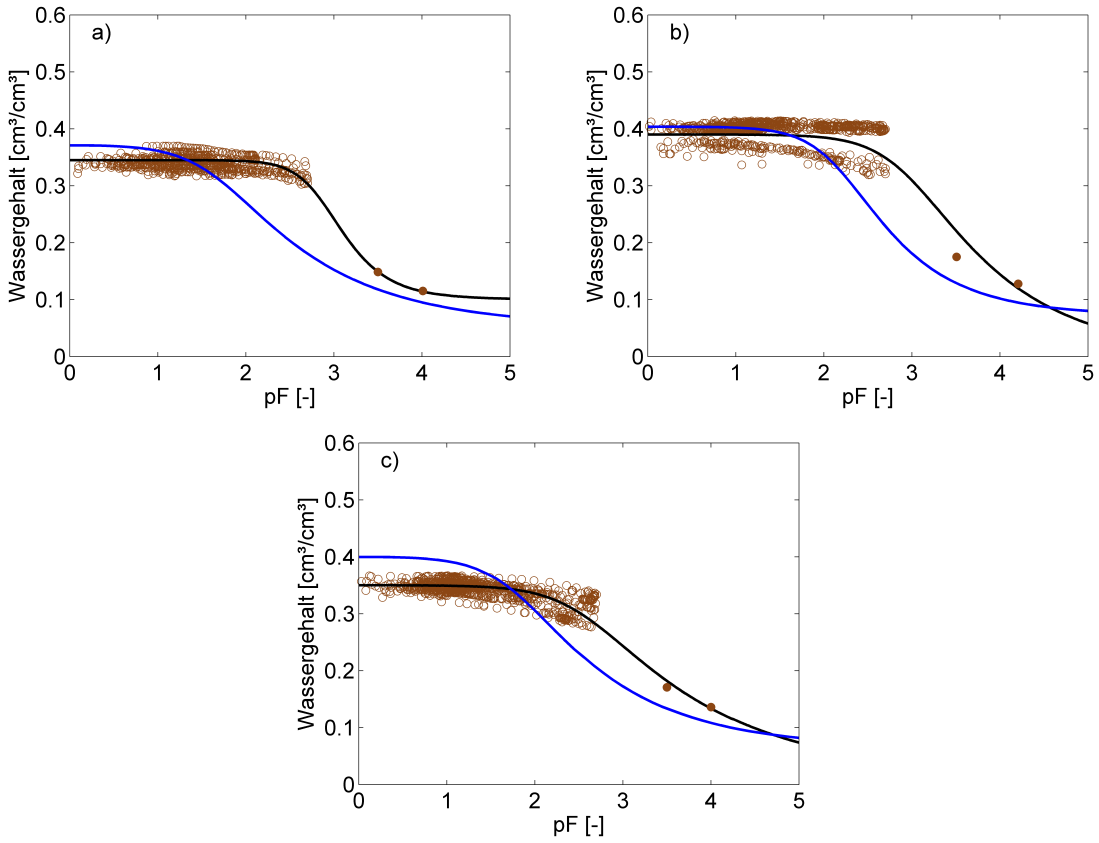

Abbildung 13: An die gemessenen Tensions- und Wassergehaltsdaten angepasste Retentionsfunktionen (schwarz) für die Böden aus Grafenried (a), Reckenholz (b) und Schafisheim (c). Es wurden zusätzliche Punkte bei pF 3,5 und 4 generiert (ausgefüllt). Blau: Retentionskurven aus Rosetta Lite.

sungen an die Retentionsdaten einen sehr geraden Verlauf bis pF 2 aufweisen. Zusätzlich dazu sind die Retentionskurven, die über Rosetta Lite ermittelt wurden eingezeichnet. Die Retentionskurve der Pedotransferfunktion hingegen zeigt einen sehr viel früheren Abfall. Diese Unterschiede spiegeln sich auch in den ermittelten bodenhydraulischen Eigenschaften wieder (Tabelle 10).

Die Unterschiede der beiden Kurven sind deutlich, allerdings beinhaltet Rosetta Lite Informationen über das gesamte Bodenprofil, die Anpassung an die Retentionsdaten umfassen lediglich punktuelle Messungen ab einer Tiefe von 30 cm. Die für die Anpassung generierten Punkte beinhalten ebenfalls nur Informationen aus den entsprechenden Horizonten.

Tabelle 10: Bodenhydraulische Eigenschaften der Böden aus Grafenried, Reckenholz und Schafisheim aus der Anpassung an die in situ gemessenen Retentionsdaten und Rosetta Lite (Schaap et al., 2001).

Grafenried	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	α [cm^{-1}]	n [-]	K_s [$cm\,d^{-1}$]
in situ	0,10	0,35	0,0013	2,10	21
Rosetta Lite	0,05	0,37	0,0230	1,37	15
Reckenholz	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	α [cm^{-1}]	n [-]	K_s [$cm\,d^{-1}$]
in situ	0,00	0,39	0,0012	1,40	12
Rosetta Lite	0,07	0,40	0,0068	1,57	8
Schafisheim	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	α [cm^{-1}]	n [-]	K_s [$cm\,d^{-1}$]
in situ	0,01	0,35	0,0030	1,30	51
Rosetta Lite	0,06	0,40	0,0179	1,39	14

3.2 Obere Randbedingung

Die obere Randbedingung wurde jeweils aus der Wasserbilanz der drei Lysimeter ermittelt (Gleichung 5).

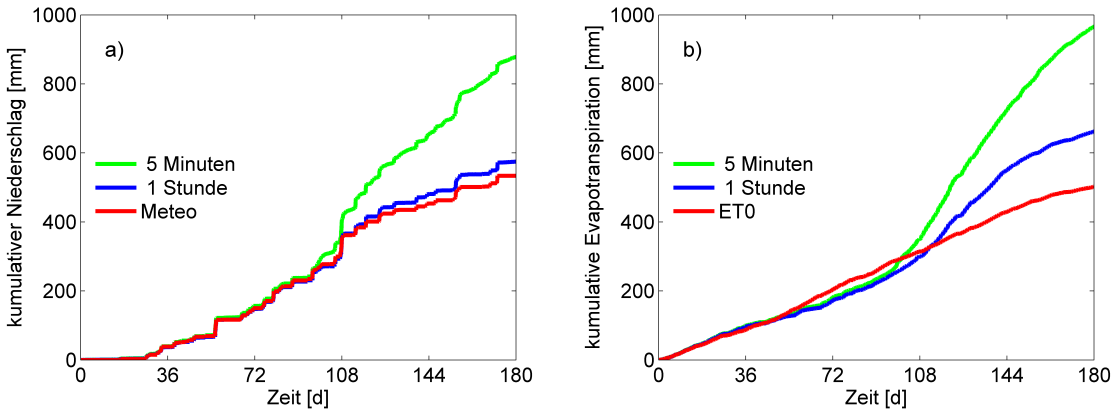

Abbildung 14: Aus den Gewichtsänderungen des Lysimeters 7 ermittlete kumulativer Niederschlag (a) und Evapotranspiration (b) für zeitliche Auflösungen von 5 Minuten und 1 Stunde, sowie meteorologischer Niederschlag (10 Minuten) und ET0 nach Penman-Monteith.

Je kleiner das Aufzeichnungsintervall ist, umso genauer können schon leichte Veränderungen des Lysimetergewichts erfasst werden. Bei Aufzeichnungen in stündlicher Auflösung werden ungewollte Gewichtsunterschiede, die zum Beispiel durch das Betreten des

Lysimeters oder Windeinfluss auftraten, nicht unbedingt erfasst. Allerdings können Informationen verloren gehen. Die kumulativen Werte für Evaporation und Niederschlag, berechnet für einen Zeitraum von 6 Monaten, zeigen deutliche Abweichungen der höheren Auflösung von den Stundenwerten und den meteorologischen Daten (Abbildung 14). Allerdings weicht der stündlich berechnete kumulative Niederschlag nur um 41 mm vom 10-minütlich gemessenen Niederschlag ab. Verglichen damit weist die 5-Minuten-Auflösung eine Differenz von 310,1 mm zum stündlich berechneten und 352 mm zum gemessenen Niederschlag der Wetterstation auf. Diese Beobachtung lässt auf ungewollte Einflüsse schließen, die auf das Lysimeter eingewirkt haben und von der sensiblen Waage erfasst wurden.
Genau wie der Niederschlag zeigt auch die kumulative Verdunstung starke Unterschiede hinsichtlich des Gesamtverlaufs; die ETp nach Penman-Monteith (Gleichung 1) unterschätzt sogar die stündliche Verdunstung aus der Lysimeterwägung (Abbildung 14 b). Das ist dadurch zu erklären, dass es sich bei ET0 um eine Gras-Referenzverdunstung handelt. Die Lysimeter jedoch sind mit Kulturpflanzen bestellt, die ihrerseits jeweils unterschiedliche Transpirationen während der einzelnen Reifephasen aufweisen (Allen et al., 1998).
Der anfänglich sehr ähnliche Verlauf der drei Summenkurven driftet ab dem 10.07.2009 auseinander. Diesem Datum voraus ging ein Starkregenereignis am 5.07.2009 mit 24 mm Niederschlag, sowie Niederschlagsmengen von 1,4, 6,1, 2,0 und 7,8 mm an den darauffolgenden Tagen. Zusätzlich dazu befand sich der ausgesäte Körnermais bereits im Aufwuchs und stellte dadurch eine Angriffsfläche für den Wind dar.
Die gemittelte 10-m-Windgeschwindigkeit betrug am 8.07.2009 immerhin 3,5 $\mathrm{m\,s^{-1}}$; das entspricht 2,62 $\mathrm{m\,s^{-1}}$ in 2 m Höhe nach nach FAO (1998).

$$u_2 = u_l \frac{4{,}87}{ln(67{,}8z - 5{,}42)}, \tag{24}$$

mit

u_2 Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [$\mathrm{m\,s^{-1}}$]

u_l Windgeschwindigkeit in z m Höhe [$\mathrm{m\,s^{-1}}$]

l Höhe der Messung [m].

Die täglichen Windgeschwindigkeiten in dem betrachtenen Zeitraum ist in Abbildung 15a dargestellt. Die höchsten Windgeschwindigkeiten traten am 29.11.09 und am 9.03.10 mit 4,56, bzw. 4,19 $\mathrm{m\,s^{-1}}$ auf. Anhand der Windrose (Abbildung 15b) ist erkennbar, dass

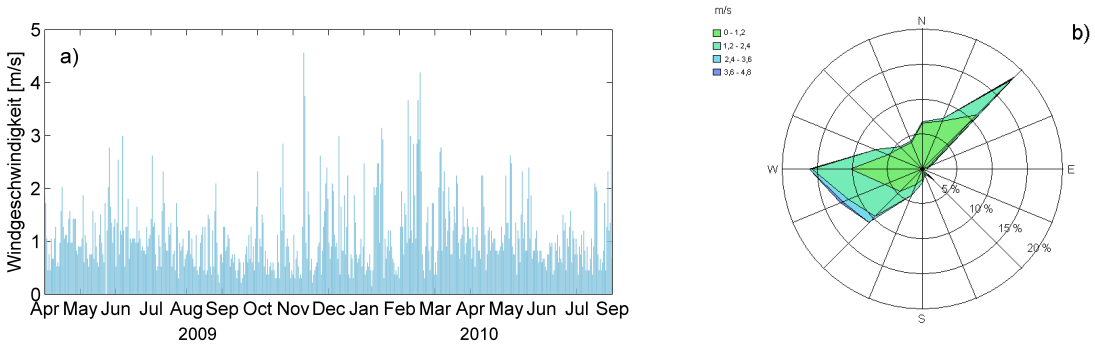

Abbildung 15: Windgeschwindigkeiten [m s^{-1}] in 2 m Höhe in dem Zeitraum vom 1.4.09 - 2.09.10 (a). Verteilung der Windrichtungen und -stärken (b).

West-Südwest und Nordost die Hauptwindrichtungen sind. Die untersuchten Lysimeter befinden sich am westlichen Rand der Lysimeterstation, sodass Einflüsse des Winds auf die Gewichtsmessungen nicht ausgeschlossen werden können. Der Windeinfluss wird durch die individuelle Bewirtschaftung der Lysimeter zusätzlich verstärkt, da dadurch Inseleffekte auftreten. Man kann vermuten, dass bei einer Einbettung der bewachsenen Lysimeter in ein Feld deutlich geringere Windeffekte auftreten.
Howell et al. (1995) nennen Wind, der auf die Lysimeteroberfläche drückt als die stärkste Ursache für Wiegefehler bei Lysimetern; besonders Windgeschwindigkeiten über 5 m s^{-1} haben deutliche Auswirkungen auf die Standardabweichung der Lysimeterwaage. Sie schlagen für die Berechnung der Evapotranspiration aus der Wasserbilanz Messintervalle von 30 Minuten vor; Auflösungen von 5 Minuten bieten die Möglichkeit, Gewichtsveränderungen durch markante Ereignisse, wie Beregnung oder starken Niederschlag zu verfolgen. Eine ähnliche Annahme trifft Cepuder (2000); er macht die Genauigkeit der Messergebnisse von den Messintervallen abhängig. Demnach können die Messintervalle durchaus weniger als 10 Minuten betragen, für den Fall, dass die zeitliche Änderung der oberen Randbedingung (z.B. bei plötzlichem Niederschlag) es erfordert.
Die bewachsenen Großlysimeter sind aufgrund der Höhe der Kulturpflanzen deutlich anfälliger für Wiegefehler durch Wind, als beispielsweise Gras-Referenzlysimeter, wie Studien von Vaughan & Ayars (2009) belegen. Demnach gibt es einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen der stündlich gemessenen Windgeschwindigkeit und der Standardabweichung der Lysimeterwaage. Ein ähnliches Ergebnis liefern auch Howell et al. (1995). Nach Nolz et al. (2008) sind Wiegefehler durch Windeinfluss für tägliche Daten

zu vernachlässigen, nicht jedoch für kürzere Zeitintervalle.
Aufgrund der deutlichen Abweichungen der höher aufgelösten Daten von den meteorologischen Messergebnissen wurden für die Beschreibung der oberen Randbedingung für die inverse Simulation geringer aufgelöste Werte verwendet. Abbildung 16a lässt erkennen, dass bei hoher Auflösung (in diesem Fall 1 Stunde) ein enormer Unterschied zum gemessenen Meteo-Niederschlag besteht. Der Gesamtniederschlag, der auf das Lysimeter getroffen ist liegt mehr als 300 mm über dem gemessenen Meteo-Niederschlag. Dieser beinhaltet nicht das Auftreten von Tau, wodurch das Lysimeter zwangsläufig höhere Niederschläge aufweist. Wie in Abbildung 17 zu erkennen ist, wirkt Tau im Laufe der frühen Morgenstunden auf das gemessene Lysimetergewicht ein. Bei Sonnenaufgang verdunstet der Tau und das Lysimetergewicht wird reduziert. Je gröber die Auflösung gewählt wird, desto eher entspricht das Ergebnis dem der Meteo-Station; auffällig dabei ist jedoch die permanente Unterschätzung des Meteo-Niederschlags bei einer Auflösung von 12 Stunden (Abbildung 16a). Ein ähnliches Bild zeigen die Verläufe der kumulativen Evapotranspiration (Abbildung 16b). Entsprechend den berechneten Niederschlägen, sinkt der Gesamtwert der Evapotranspiration mit abnehmender Auflösung.
Die Berücksichtigung von lediglich 2 Werten am Tag ist demzufolge zu ungenau, um als obere Randbedingung eingesetzt zu werden. Für die Simulationen wurde eine Auflösung von 6 Stunden gewählt. In diesem Zeitintervall werden Störungen nicht weiter erfasst, Dynamiken jedoch durchaus abgebildet.
Abbildung 18a zeigt die Niederschlagsverteilungen, sowie die Evaporationen und Transpirationen exemplarisch für das Lysimeter 1. Das kumulative Sickerwasser beschreibt

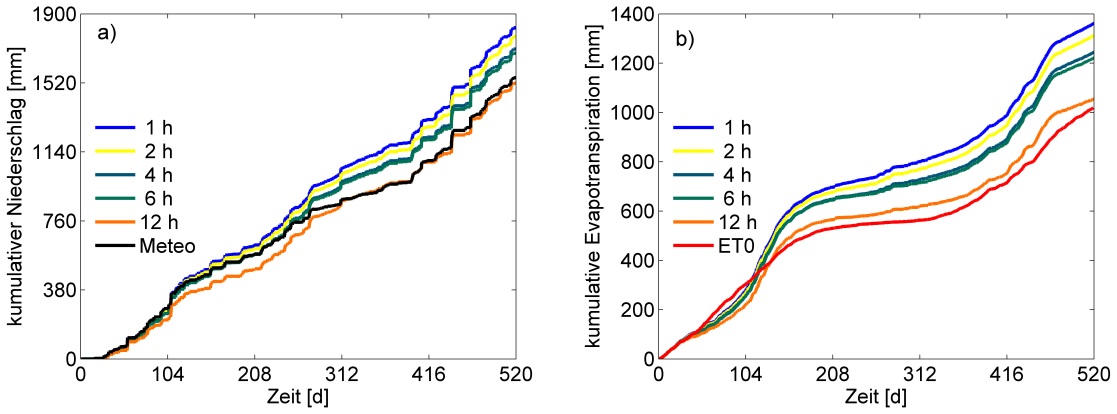

Abbildung 16: Vergleich der Verwendung verschiedener zeitlicher Auflösungen der Gewichtsänderungen des Lysimeters 7 zur Bestimmung des relevanten Niederschlags (a) und der Evapotranspiration (b).

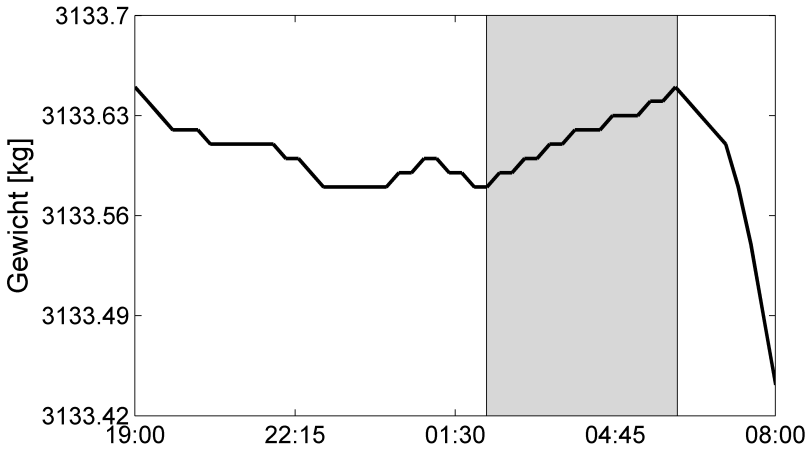

Abbildung 17: Gewichtsveränderung in der Nacht vom 30.04. 19:00 - 01.05.09 8:00. Der graue Abschnitt signalisiert den Einfluss von Tau in den frühen Morgenstunden. Es wurde in diesem Zeitraum kein Sickerwasser und kein Niederschlag gemessen.

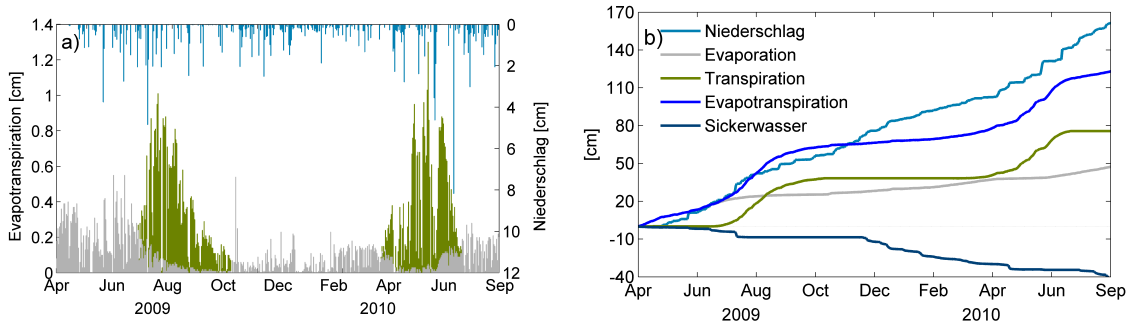

Abbildung 18: Obere Randbedingung des Lysimeters 1 für den Zeitraum 1.4.09 - 1.9.10. Täglicher Niederschlag (blau), Evaporation (grau) und Transpiration (grün)(a). Kumulativer Niederschlag, Evapotranspiration und Sickerwasser (b). Die Evapotranspiration ist zusätzlich aufgeteilt in Evaporation und Transpiration.

die Dynamik am unteren Rand des Lysimeters. Ebenfalls dargestellt sind die kumulativen Werte für Niederschlag und Evapotranspiration, sowie die Aufteilung in Evaporation und Transpiration (Abbildung 18b).

3.3 Simulationen

Aufgrund der starken Ähnlichkeiten zwischen den drei Lysimetern werden hier exemplarisch die Ergebnisse für das Lysimeter 1 gezeigt und diskutiert. Die Ergebnisse für die Lysimeter 5 und 12 befinden sich im Anhang.

3.3.1 Vorhersagen

Die Vorwärtssimulationen mit den bodenhydraulischen Eigenschaften aus den in situ-Daten, sowie der Pedotransferfunktion sind in Abbildung 19 dargestellt. Die Residuen (unterhalb der Hauptgraphik) zeigen die Abweichungen der Vorhersage zu den gemessenen Daten. Es fällt auf, dass in beiden Fällen die Dynamik des Sickerwassers ebenfalls im Großen und Ganzen korrekt dargestellt wird, allerdings kommt es zu deutlicheren Über- und Unterschätzungen als bei der inversen Simulation. Das ist insofern nicht verwunderlich, als dass bei der inversen Simulation die gemessenen Daten direkt in die Simulation eingehen und die Differenzen zwischen Daten und Modell im Laufe der Optimierung reduziert werden. Jedoch lässt sich sagen, dass durch die Verwendung von Pedotransferfunktionen und Anpassungen an gemessene Daten die Prozesse im Boden nur bedingt wiedergegeben werden können.

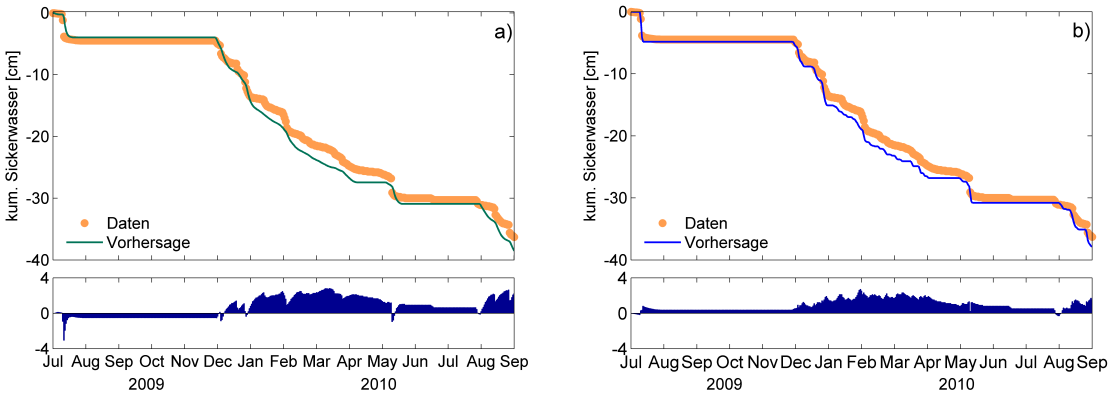

Abbildung 19: Vorhersagen des Sickerwassers über Vorwärtssimulationen anhand der in situ-Daten (a) und der Pedotransferfunktion Rosetta Lite (b).

3.3.2 Inverse Modellierung mit Tensionsdaten

Es wurden zunächst das kumulative Sickerwasser, der profilgemittelte Wassergehalt und Tensionsmessungen in den Tiefen 30, 60 und 90 cm in der Zielfunktion verwendet (Ab-

bildung 20). Die Residuen der Anpassung sind jeweils unterhalb der Hauptgraphiken gezeigt. Sowohl das Sickerwasser, als auch der Wassergehalt konnten zufriedenstellend dargestellt werden. Ein anderes Bild zeigen die Drucktensiometer: Die Dynamiken konnten zwar nachgestellt werden, jedoch wurde nicht der gesamte Potentialbereich erfasst. In der Simulation trocknet der Boden deutlich weniger stark aus (Sommer 2009 in allen Tiefen) und wird umgekehrt auch während der Wintermonate nicht so feucht, wie die Sensoren es angeben.
Eine höhere Wichtung der Matrixpotentiale von 0,01 sorgte nur geringfügig für eine bessere Anpassung an diese, jedoch wurden sowohl der kumulative Ausfluss, als auch der Wassergehalt vom Modell deutlich schlechter getroffen als in der vorigen Simulation.
Dieses schlägt sich entsprechend in den RMSE Werten nieder (Tabelle 11).
Auch die Simulation mit dem Free-Form-Ansatz weist nur eine geringfügig bessere Anpassung Q und Θ_{av} auf (Abbildung 20). Die Tensionen in 30 und 60 cm Tiefe werden zwar besser getroffen, in 90 cm Tiefe allerdings zeigt das van Genuchten-Mualem-Modell eine geringfügig bessere Anpassung (Abbildung 20 und Tabelle 11). Bei dem Free-Form-Ansatz wurden 7 Knotenpunkte benötigt, um die bodenhydraulischen Eigenschaften zu beschreiben (Abbildung 32 im Anhang). Das bedeutet, dass insgesamt 16 Parameter geschätzt wurden: Jeweils 7 Punkte auf der Retentions- und Leitfähigkeitskurve, sowie Θ_s und K_s.
Diese Erkenntnis entspricht nur bedingt den Ergebnissen von Durner et al. (2008), die für schwach heterogene Profile sowohl die Randflüsse, als auch die Dynamiken innerhalb eines Lysimeters mit effektiven Parametern nachbilden konnten. Dabei wurden jeweils unbewachsene, 2-schichtige Profile untersucht. Die Horizontabfolge des Bodens aus Grafenried lässt auf den ersten Blick auf einen schwach heterogenen Boden schließen, da sich die einzelnen Horizonte in ihrer Textur stark ähneln.

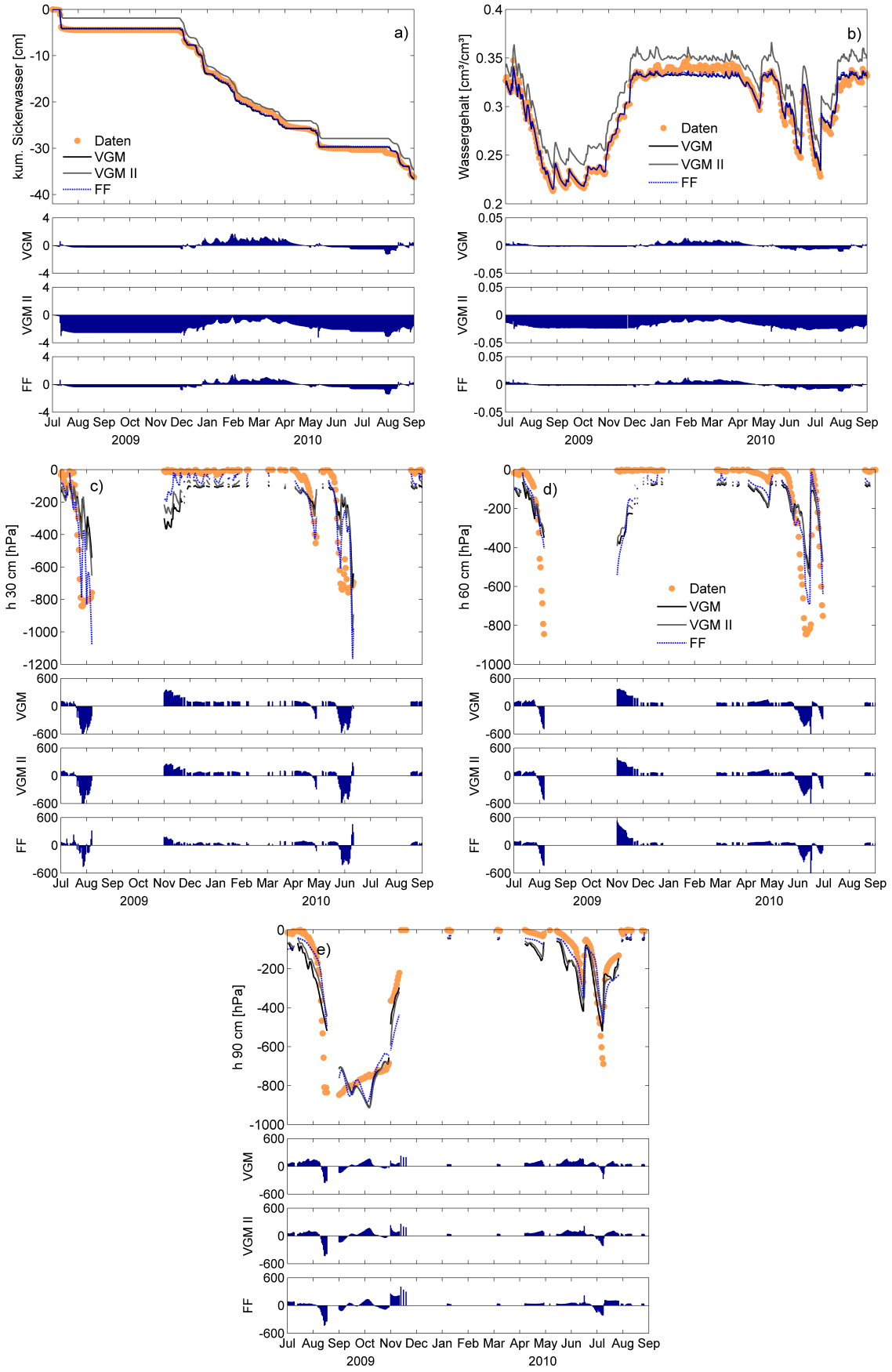

Abbildung 20: Kumulatives Sickerwasser (a), profilgemittelter Wassergehalt (b) und Tensionsmessungen in den Tiefen 30 (c), 60 (d) und 90 cm (e). Inverse Simulation mit dem van Genuchten-Mualem-Modell (schwarz), mit stärkerer Wichtung (grau) und dem Free-Form-Modell (blau).

Tabelle 11: Root Mean Square Errors (RMSE) der inversen Simulationen für Lysimeter 1 (Grafenried). Q = kumulatives Sickerwasser, Θ = mittlerer Wassergehalt, h_d = Tensionsmessungen in der Tiefe d. VGM = van Genuchten-Mualem, II = höhere Wichtung der Matrixpotentiale (0,01), FF = Free-Form.

Szenario	Q [cm]	Θ [$cm^3\,cm^{-3}$]	h_{30} [cm]	h_{60} [cm]	h_{90} [cm]
VGM	0,52	0,005	213,70	181,09	104,95
VGM II	2,07	0,02	198,27	171,98	101,21
FF	0,50	0,0048	134,06	159,15	106,06

Jeder der vier Horizonte wurde im Rahmen der Profilansprache als sandiger Lehm (sL) angesprochen. Die exakte Beschreibung der gemessenen Matrixpotentiale in unterschiedlichen Tiefen war hier nicht möglich, was darauf hindeutet, dass die Behandlung des Profils als scheinbar homogen zu keiner zufriedenstellenden Beschreibung der Daten führt. Für die Nachbildung des Sickerwassers, sowie des profilgemittelten Wassergehalts ist diese Annahme jedoch durchaus berechtigt.

3.3.3 Inverse Modellierung ohne Tensionsdaten

Für weitere Simulationen wurden nur das Sickerwasser und der profilgemittelte Wassergehalt in der Zielfunktion beachtet. Auch die hohe Flexibilität des Free-Form-Ansatzes war nicht ausreichend, um zusätzlich die Tensionen exakt beschreiben zu können. Dieses lässt vermuten, dass eine gemeinsame Beschreibung der drei Parameter in diesem Fall generell nicht möglich ist. Die nur geringfügig bessere Anpassung durch den Free-Form-Algorithmus lässt es zu, für weitere Simulationen das Modell nach van Genuchten-Mualem zu verwenden, da dieses zwar an und für sich unflexibler ist, aber gleichzeitig eine geringere Simulationszeit benötigt.
Die Anpassung dieser beiden Messgrößen über den gesamten Zeitraum (Wachstumsperioden von Mais und Weizen) zeigt Abbildung 21. Der RMSE für den Wassergehalt liegt mit 0,005 $cm^3\,cm^{-3}$ unterhalb der Genauigkeit der Lysimeterwaage. Der RMSE des Sickerwassers ist mit 0,52 cm sehr hoch (Tabelle 12), was allerdings angesichts realer Messdaten akzeptabel ist. Das anfänglich plötzliche Auslaufen des Sickerwassers wird von der Simulation gut erfasst, ebenso wie der darauf folgende Zeitraum ohne Sickerwasser. Anhand der Residuen zeigt sich, dass der kumulative Ausfluss bis zu diesem Bereich leicht unterschätzt wurde. Dieses ist ebenfalls in der Anpassung an den profilgemittelten Wassergehalt zu erkennen. Während der Wintermonate ist der Boden sehr

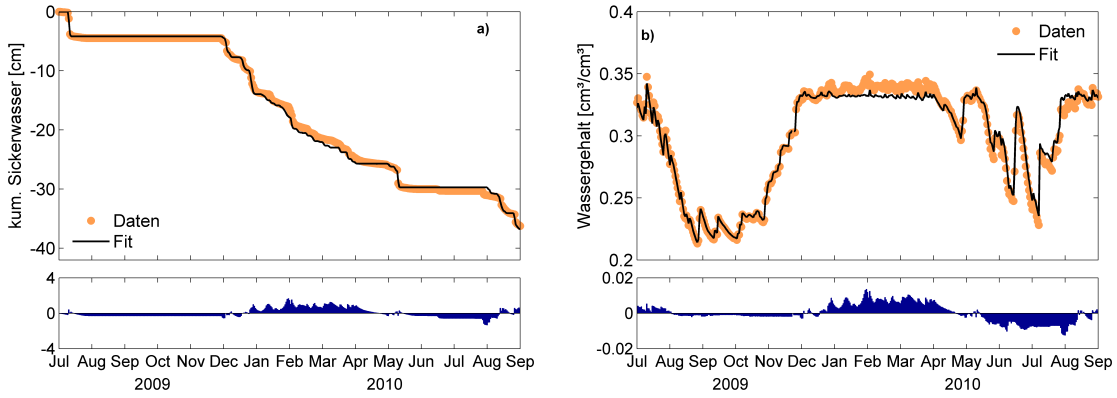

Abbildung 21: Kumulatives Sickerwasser (a) und profilgemittelter Wassergehalt (b). Inverse Simulation (schwarze Linie) mit dem VGM-Modell.

feucht, wodurch ein intensiverer Fluss über den unteren Rand stattfindet. Die damit verbundene Dynamik kann durch das Modell in groben Zügen abgebildet werden, jedoch kommt es insgesamt zu einer Überschätzung des Sickerwassers. Damit einher geht eine Unterschätzung des mittleren Wassergehalts. Die Daten zeigen im Frühjahr eine trockenere Phase mit nur teilweisem Austreten von Sickerwasser. Dieser Ausfluss wird durch das Modell nicht wiedergegeben. Dieses lässt zum einen auf präferenziellen Fluss schließen, der beispielsweise durch große Poren hervorgerufen wird. Zum anderen zeigt es, dass es dem Modell an Flexibilität fehlt, da die Richards-Gleichung das Auftreten von präferenziellem Fluss nicht beachtet. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich auch bei dem profilgemittelten Wassergehalt, bei dem die Dynamik an sich zwar gut getroffen wird, es allerdings auch hier zu einer Unterschätzung kommt. Der Verlauf der Residuen beider Anpassungen zeigt große Übereinstimmungen, was bedeutet, dass Über- oder Unterschätzungen für beide Anpassungen nahezu gleich gewesen sind. Laut Schelle et al. (2012) stellen starke Über- oder Unterschätzungen ein Problem bezüglich der Reproduzierbarkeit der Wasserbilanz dar; die gemessene aktuelle Evapotransiration kann von der Simulation nicht nachgebildet werden. Sie schreiben diese Effekte Prozessen innerhalb des Bodens zu, die im Modell nicht berücksichtigt werden.

Auffällig für alle Simulationen über den gesamten Zeitraum ist die Unterschätzung des Wassergehalts während der Wintermonate (Abbildung 33 für Lysimeter 5 und 12). Gefallener Schnee wurde nicht von den Lysimetern entfernt, wodurch es zu Überschätzungen des Lysimetergewichts und damit des gesamten Wassergehalts kommen kann.

Das Auftreten von präferenziellem Fluss, bzw. die fehlende Flexibilität des Modells zeigt

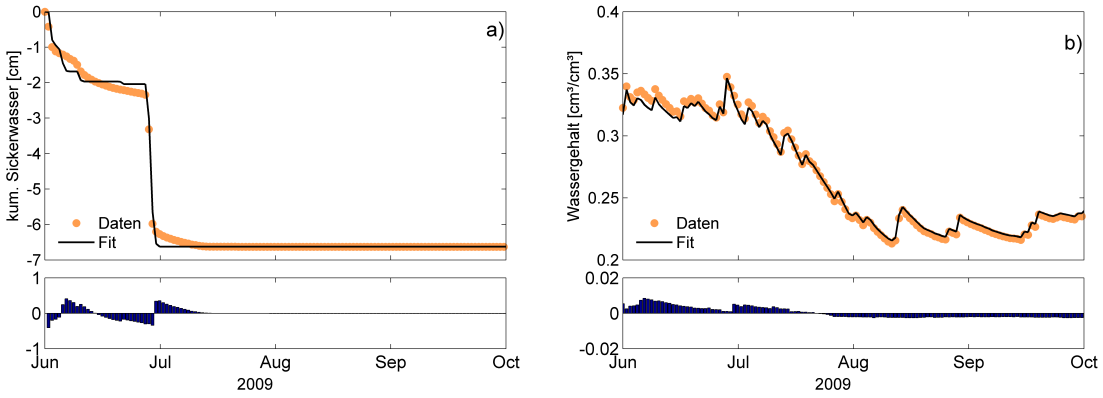

Abbildung 22: Kumulatives Sickerwasser (a) und profilgemittelter Wassergehalt (b). Inverse Simulation (schwarze Linie) für die Vegetationsphase des Körnermais.

sich auch in den beiden kürzeren Szenarien (Abbildungen 22 und 23). Das anfängliche Sickerwasser wird vom Modell zwar erfasst, jedoch kann die anschließende Dynamik (besonders für den Körnermais) nur in groben Zügen erfasst werden, wodurch es zu Über- und Unterschätzungen des Sickerwassers kommt. Beim Winterweizen zeigt sich erneut das wahrscheinliche Auftreten von präferenziellem Fluss zum Ende der Wachstumsperiode, welcher durch das Modell nicht ausgedrückt wird. Die Richards-Gleichung setzt voraus, dass alle Poren miteinander verbunden sind und der Wasserfluss somit ein homogener Prozess ist; demnach sind alle Poren gleichermaßen am Fließprozess beteiligt. Diese Voraussetzungen sind allerdings nicht immer gegeben. Durch präferenziellen Fluss wird beispielsweise die Gültigkeit der Richards-Gleichung deutlich eingeschränkt. Zudem können lokale Diskontinuitäten und Effekte wie Hysterese nicht einbezogen werden (Gerke et al., 1999). Obwohl präferenzielle Fliesswege eher in grobkörnigen Böden erwartet werden, können durch Effekte wie Quellen und Schrumpfen oder die Anwesenheit von Regenwürmern ebenfalls Makroporen und somit neue Fliesswege entstehen.
Die alles in allem gute Anpassung des Modells an die Daten, sowie die Übereinstimmung der Residuen beider Anpassungen ist ein Zeichen für eine korrekte obere Randbedingung. Besonders wichtig dabei ist die exakte Angabe der Evapotranspiration als treibende Kraft der Wasserbilanz und entsprechend des Ausflusses und Wassergehaltsänderungen. Der Wasserfluss innerhalb des Lysimeter ist vor allem durch den Fluss über den oberen Rand gesteuert (Zurmühl, 1998).
Ein Vergleich der bodenhydraulischen Eigenschaften der drei Methoden zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Retentions- und Leitfähigkeitsfunktion. Wie in Abbildung

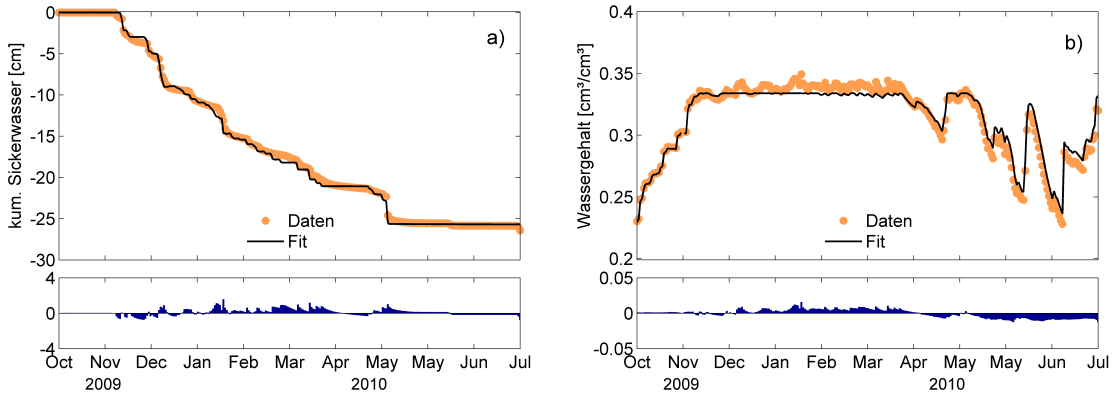

Abbildung 23: Kumulatives Sickerwasser (a) und profilgemittelter Wassergehalt (b). Inverse Simulation (schwarze Linie) für die Vegetationsphase des Winterweizens.

Tabelle 12: Root Mean Square Errors (RMSE) der Ergebnisse der inversen Simulationen der Szenarien für Lysimeter 1 (Grafenried) mit dem van Genuchten-Mualem-Modell.

Szenario	Q [cm]	Θ_{av} [$cm^3\,cm^{-3}$]
Mais	0,13	0,003
Weizen	0,37	0,006
Mais+Weizen	0,52	0,005

24 ersichtlich liefern die inverse Modellierung und die Pedotransferfunktion nahezu denselben Sättigungswassergehalt. Bei höheren pF-Werten, also trockeneren Bedingungen, laufen die beiden Kurven jedoch auseinander. Die Kurve der in situ Daten aus der Anpassung an die Tensions- und Bodenfeuchtedaten zeigt von Beginn an einen deutlich anderen Verlauf. Dies ist auf mangelnde Informationen bei pF-Werten größer 2,7 zurückzuführen. Die im Lysimeter gemessenen Daten zeigen einen nahezu waagerechten Verlauf von der vollständigen Sättigung bis zu einem pF von 2, was die hohen Gehalte an Schluff und Ton im Boden bestätigt. Im trockeneren Bereich zeigen die Retentions- und Leitfähigkeitskurve der inversen Modellierung eine höhere Unsicherheit, verglichen mit den Kurven der in situ-Anpassung und Rosetta Lite (Abbildung 24). Dieses lässt sich aus dem weiten Konfidenzintervall erkennen. Das ist darin begründet, dass in diesem Bereich keine Daten mehr vorliegen. Die Kultivierung der Lysimeter hat scheinbar einen Einfluss auf die bodenhydraulischen Eigenschaften, wie der Vergleich der drei Szenarien zeigt. Die

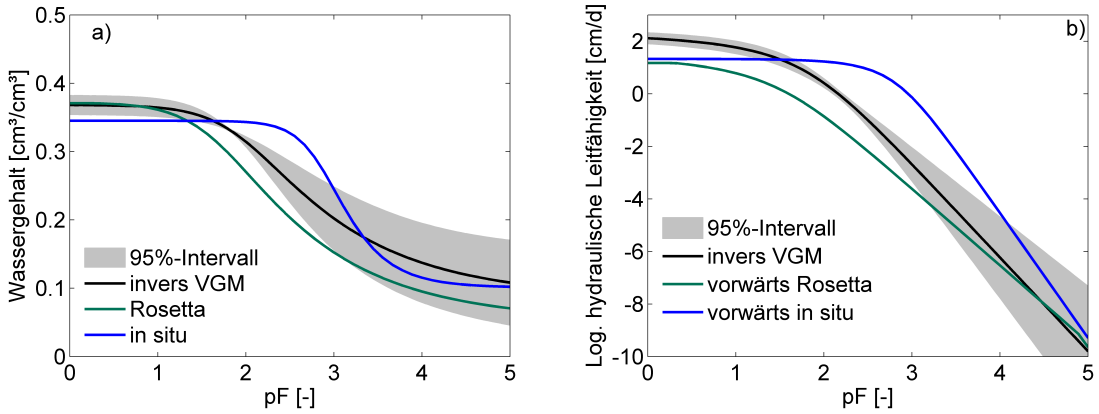

Abbildung 24: Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) für Lysimeter 1 (Grafenried). Verglichen werden die Vorwärtssimulationen (in situ und Rosetta) und die inverse Modellierung. Die grauen Bereiche repräsentieren die 95 %-Konfidenzintervalle.

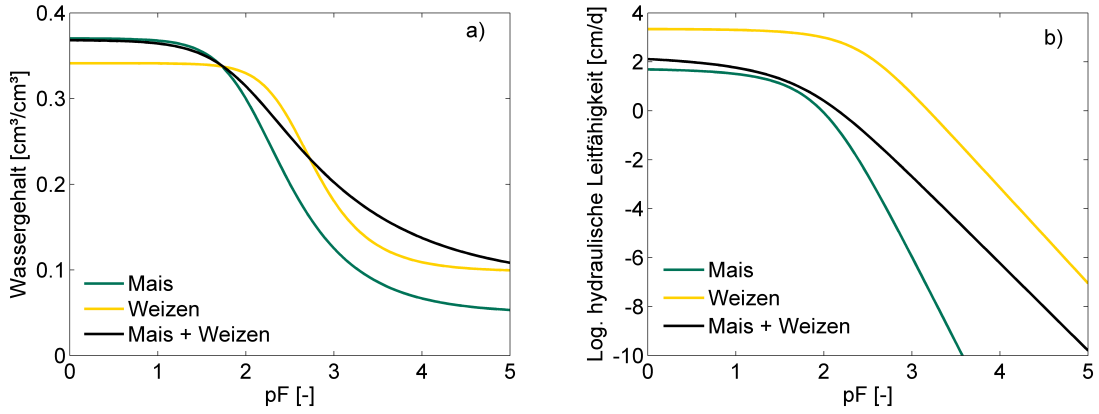

Abbildung 25: Geschätzte Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) für Lysimeter 1 (Grafenried) für die drei Szenarien.

Retentionskurve der Maisperiode ähnelt der Kurve des gesamten Zeitraums sehr (Abbildung 25). Im Gegensatz dazu weist die Retentionskurve des Winterweizens einen niedrigeren Sättigungswassergehalt auf und umfasst in ihrem Verlauf einen deutlich geringeren Bereich bezüglich des Wassergehalts (Tabelle 13). Dieses spricht für gewöhnlich für eine Verdichtung des Bodens und somit eine Verringerung des Porenraums. Im Ackerbau ist diese Erscheinung durchaus zu erwarten, da durch das Befahren mit Landmaschinen Verdichtungen des oberen Bodens auftreten können. Die Bearbeitungen der Lysimeter wurden jedoch von Hand durchgeführt, sodass zu erwarten ist, dass keinerlei Verdichtung aufgetreten ist. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass es auch bei der

manuellen Bearbeitung und Ernte zu deutlichen Veränderungen des Bodengefüges des oberen Horizonts kommen kann. Diese Vermutung wird dadurch gestützt, dass beim Vergleich der drei Szenarien die Retentionskurve der Weizenperiode Unterschiede bereits im Sättigungswassergehalt zeigt. Eine Ausnahme bildet der Boden aus Schafisheim (Lysimeter 12), bei dem die größte Ähnlichkeit zwischen den Retentionskurven besteht (37c im Anhang).

Die Gesamtsimulation beachtet die Veränderung des Bodengefüges nach der Maisernte nicht, sodass größere Ähnlichkeiten zur Maissimulation als zur zeitlich späteren Weizenperiode bestehen. Hinsichtlich der Unsicherheiten zeigen die geschätzten Retentions- und Leitfähigkeitskurve des längeren Zeitraums ein recht breites Konfidenzintervall im feuchten, aber besonders im trockenen Bereich. Die Unsicherheiten der Weizensimulationen sind dagegen sehr gering (Abbildung 26). Das bedeutet, dass die geschätzten

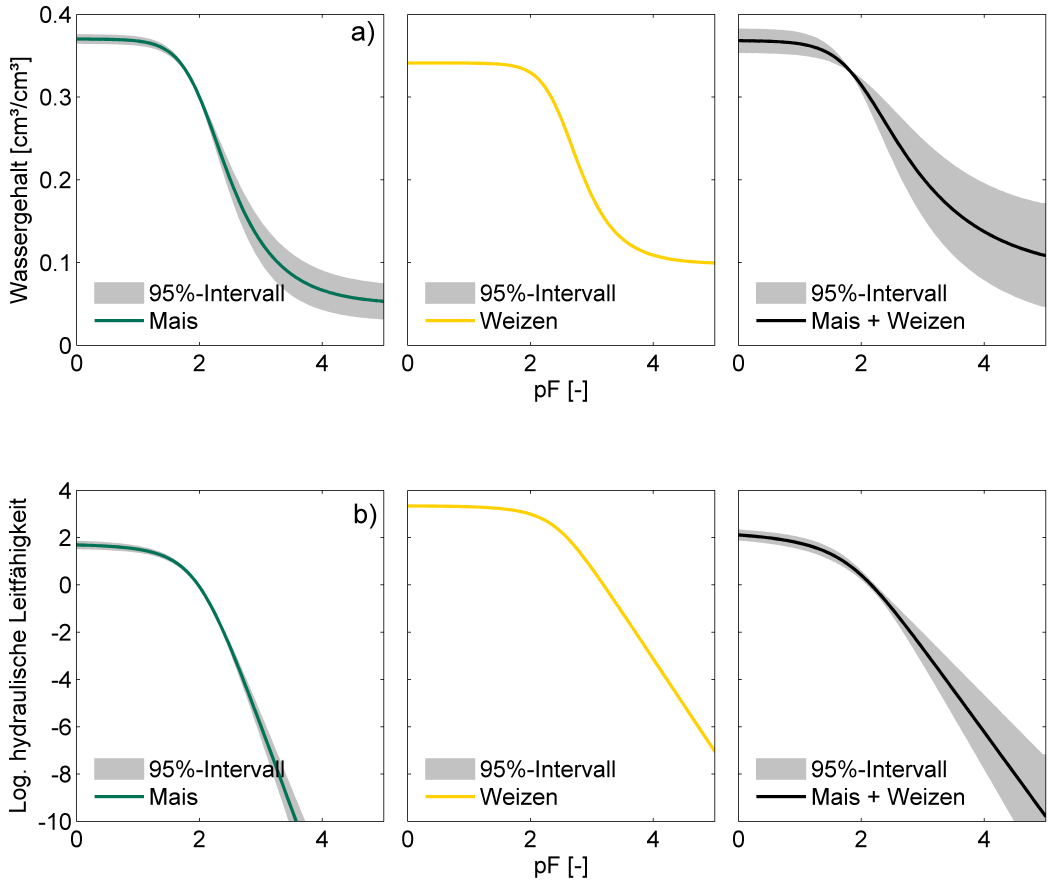

Abbildung 26: 95%-Konfidenzintervalle der Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) für die drei Szenarien.

bodenhydraulischen Eigenschaften eine größere Sicherheit besitzen. Diese Tatsache lässt sich jedoch für die Böden aus Reckenholz und Schafisheim nicht erkennen, da dort die Konfidenzintervalle für alle Szenarien auffällig eng sind (Abbildungen 38 und 39 im Anhang). Für die kürzeren Szenarien wurden die von Wesseling (1991) spezifisch für diese Kulturart vorgeschlagenen Feddes-Parameter verwendet, wohingegen die Gesamtsimulation eine Mischung dieser Parameter beinhaltete. Dieses könnte ebenfalls eine Ursache für die Unterschiede sein, da sich die Feddes-Parameter von Mais und Weizen ziemlich stark unterscheiden. Eine Kombination dieser Parameter scheint entsprechend zu einer größeren Unsicherheit der geschätzten hydraulischen Parameter zu führen. Es ist zweifelsfrei erkennbar, dass die bodenhydraulischen Eigenschaften keine dauerhaft festen Parameter sind, sondern sich entsprechend der Nutzung des Bodens verändern.
Wahren et al. (2009) fanden ähnliche Ergebnisse bezüglich verschiedener Landnutzungsformen.
Die hier gezeigten Ergebnisse lassen jedoch Vermutungen darüber zu, dass schon Fruchtwechsel zu Änderungen der bodenhydraulischen Eigenschaften führen können.

Tabelle 13: Durch inverse Modellierung ermittelte van Genuchten-Mualem-Parameter (VGM) der drei Szenarien Körnermais, Winterweizen und Körnermais + Winterweizen. Zusätzlich ist die Standardabweichung σ der geschätzten Parameter angegeben.

Szenario	VGM-Parameter		σ
Mais	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,05	$1{,}03{\cdot}10^{-2}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,37	$2{,}70{\cdot}10^{-3}$
	α [cm^{-1}]	0,0093	$4{,}90{\cdot}10^{-4}$
	n [-]	1,06	$5{,}20{\cdot}10^{-2}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	55	$1{,}41{\cdot}10^{1}$
	τ [-]	5,91	$2{,}49{\cdot}10^{-2}$
Weizen	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,01	$4{,}58{\cdot}10^{-4}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,34	$4{,}70{\cdot}10^{-4}$
	α [cm^{-1}]	0,0031	$5{,}88{\cdot}10^{-5}$
	n [-]	1,91	$2{,}50{\cdot}10^{-4}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	2212	$4{,}25{\cdot}10^{1}$
	τ [-]	0,10	$3{,}73{\cdot}10^{-4}$
Mais+Weizen	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,09	$3{,}60{\cdot}10^{-2}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,37	$7{,}20{\cdot}10^{-3}$
	α [cm^{-1}]	0,0100	$3{,}08{\cdot}10^{-3}$
	n [-]	1,36	$1{,}13{\cdot}10^{-2}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	206	$7{,}14{\cdot}10^{1}$
	τ [-]	2,41	$6{,}50{\cdot}10^{-2}$

4 Fazit und Ausblick

Es wurde versucht, durch inverse Modellierung effektive bodenhydraulische Parameter aus bewachsenen wägbaren Großlysimetern zu schätzen. Dazu wurden sowohl Tensionsdaten in verschiedenen Tiefen, als auch kumulatives Sickerwasser und profilgemittelter Wassergehalt in der Zielfunktion beachtet. Die obere Randbedingung konnte aufgrund der präzisen Wägung aus der Wasserbilanz ermittelt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit hat sich herausgestellt, dass im Vergleich zu Studien, in denen unbewachsene Lysimeter (z.B. Durner et al., 2008) oder Lysimeter mit Grasvegetation (Schelle, 2012) beachtet wurden, auch die Einbeziehung aufwendigerer Kulturpflanzen, eine Nachbildung des kumulativen Sickerwassers und des profilgemittelten Wassergehalts möglich ist. Trotz Vorherrschen eines geschichteten Profils konnten effektive bodenhydraulische Eigenschaften über inverse Modellierung unter Verwendung des van Genuchten-Mualem-Modells zu ermitteln. Eine Grundvoraussetzung dafür ist

die Ermittlung der korrekten oberen Randbedingung. Dieses konnte durch die wägbaren Lysimeter der Forschungsstation Zürich-Reckenholz realisiert werden. Wichtig ist dabei die Wahl eines nachvollziehbaren Zeitintervalls für die Berechnung von Niederschlag und Evapotranspiration.
Wie die Ergebnisse gezeigt haben, ist die Gesamtmenge des Niederschlags und der Evapotranspiration stark abhängig von der Wahl des Messintervalls: Ein kleines Messintervall (eine hohe Auflösung) führt unweigerlich zu einer Überschätzung, wohingegen große Messabschnitte zu Unterschätzungen führen, die hinsichtlich des Niederschlags sogar unter dem von der Wetterstation gemessenen Niederschlag liegen. Die vorgeschlagenen hohen Auflösungen von Fank (2008) fanden in dieser Arbeit keine Verwendung. Cepuder (2001) weist ebenfalls auf eine hohe Auflösung hin, jedoch unter Berücksichtigung der jeweiligen atmosphärischen Bedingungen. Der Einfluss von Wind und Tau, den Howell et al. (1995), bzw. Meissner et al. (2007) bezüglich präziser wägbarer Lysimeter ansprechen, konnte auch für diese Daten festgestellt und entsprechend behandelt werden.
Entgegen den Erwartungen führte eine Miteinbeziehung von Tensionsdaten nicht zu einer besseren Beschreibung der Dynamiken im Lysimeter; während das Sickerwasser und der Wassergehalt erfolgreich getroffen werden konnten, wurde zwar der Verlauf der Tensionsverläufe erfasst, jedoch nicht die gemessenen Werte. Eine höhere Wichtung der Tensionen führte zu einer leicht besseren Anpassung an diese, allerdings wurden sowohl kumulatives Sickerwasser, als auch der mittlere Wassergehalt schlechter getroffen.
Der Einfluss der Vegetation durch Wurzelwasseraufnahme konnte gut in die Simulation aufgenommen werden. Für weitere Untersuchungen wäre es sehr hilfreich, detailliertere Informationen über die jeweiligen Pflanzen zu besitzen. Dazu zählen sowohl regelmäßige Messungen des Leaf Area Index, der Vegetationshöhe, als auch eine Vorstellung des Wurzelwachstums innerhalb des Lysimeters. Letzteres konnte in dieser Arbeit lediglich grob geschätzt werden. Die Wurzelwasseraufnahme konnte durch Ermittlung der Transpiration mittels Leaf Area Index (LAI) und über die Feddes-Parameter sowohl für Mais, als auch für Weizen gut dargestellt werden, obwohl in der Gesamtsimulation nicht die pflanzenspezifischen Werte verwendet wurden. Die Aufteilung in Vegegationsphasen zeigt hinsichtlich der Anpassung an das Sickerwasser und den Wassergehalt ebenso gute Ergebnisse, jedoch gibt es Unterschiede in den bodenhydraulischen Eigenschaften. Zusätzlich dazu sind die Unsicherheiten der kürzeren Abschnitte deutlich geringer, wie die engen Konfidenzintervalle gezeigt haben. Die Betrachtung dieser Abschnitte zeigt einen detaillierteren Einblick in die Veränderungen der Bodeneigenschaften. Die bodenhydraulischen Eigenschaften können demnach in dieser Arbeit nicht als feste Parameter

gesehen werden, sondern verändern sich je nach Verwendung des Bodens. Die Betrachtung eines ganzen Profils als homogen ist eine Vereinfachung, die im Rahmen dieser Arbeit gute Ergebnisse lieferte. Für genauere Kenntnis über die Variabilität der bodenhydraulischen Eigenschaften innerhalb des Lysimeters sollten die klassifizierten Horizonte einzeln behandelt werden.
Für weitere Untersuchungen sind genauere Details über die Verteilung der Wurzeln innerhalb des Lysimeters von Vorteil. Da Untersuchungen in dieser Richtung schwer durchzuführen sind, wäre es interessant, über zusätzliche Parameterschätzungen eine geeignete Parametrisierung der Wurzellänge zu ermitteln. Die Annahme eines Wurzelwachstums entsprechend dem Wachstum der oberirdischen Biomasse lieferte in dieser Arbeit gute Ergebnisse, jedoch ist dieser Ansatz rein spekulativ. Die Abschätzung des Anteils der Transpiration an der Evapotranspiration wurde über Leaf Area Indizes von ausserhalb durchgeführt; direkte Messungen an den Lysimetern könnten eine noch genauere Aufteilung der Evapotranspiration ermöglichen.
Auch wenn die Modellierung auf der Lysimeterskala immer noch nur bedingt die Verhältnisse innerhalb des freien Feldes nachbildet, so ist die Betrachtung bewachsener Großlysimeter bereits ein unentbehrlicher Schritt von der Labor- hin zur Feldskala. Weitere Untersuchungen mit Lysimeter können einen noch detaillierteren Einblick in die Prozesse im Boden liefern.

Literaturverzeichnis

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements), FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 300 S.

Asrar, G., Hipps, L. E.& Kanemasu, E. T. 1984. Assessing solar energy and water use efficiencies in winter wheat: A case study. Agricultural and Forest Meteorology, 31: 47-58.

Böhm, K. E. 2002. Lysimetrie im pflanzenbaulichen Versuchswesen - pro und contra am Beispiel des Forschungsprojektes des Bundesamt & Forschungszentrums für Landwirtschaft (BFL), Wien. In: Lysimeter - Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte. Beiträge zur Hydrogeologie, 53: 115-232, Graz.

Burdine, N. T. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. Petr. Trans., Am. Inst. Mining Metall. Eng 198: 71-77.

Cepuder, P. 2000. Erfassung der Wasserbilanzgrößen mittels Lysimeter. In: Lysimeter - Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte. Beiträge zur Hydrogeologie, 53: 115-232, Graz.

Delta-T Devices Ltd 1999. ThetaProbe, Soil Moisture Sensor, Type ML2x, USer Manual, ML2x-UM-1.21. Delta-T Devices, 128 Low Road, Burwell, Cambridge, England.

Duan, Q.Y., Gupta, V.K. & Sorooshian, S. 1993. Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. Journal of Optimization Theory and Applications Vol. 76, No. 3.

Duan, Q.Y., Sorooshian, S. & Gupta, V.K. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. Journal of Hydrology 158: 265-284.

Durner, W., Jansen, U. & Iden, S.C. 2008. Effective hydraulic properties of layered soils at the lysimeter scale determined by inverse modelling. european Journal of Soil Science, 59: 114-124.

Ecomatik, 2009. Bodenfeuchtemessung, Pflanzenwachstum, Xylemfluss. Ecomatik, Münchner Str. 22, D-85221 Dachau/Munich, Germany.

Fank, J. 2008. Parameter des Wasserkreislaufs an der Forschungsstation Wagna (Auswertung und Ergebnisse).

Feddes, R. A. 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. Journal of Hydrology, 31: 13-26.

Feddes, R. A., Kowalik, P. J., Zarandny, H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. John Wiley & Sons, New York, NY.

Gerke, H. H., Köhne, M., Vogel, T. N., Hüttl, R. F., Schaaf, W., Buczko, U., Hangen, E., Wendroth, O. & Ludwig, R. 1999. Bodenwasserhaushalt und präferentieller Fluss. In: ZALF Jahresbericht 1998/1999. Institut für Bodenlandschaftsforschung. S. 184 - 187.

Hangen, E. & Scherzer, J. 2004. Ermittlung von Pedotransferfunktionen zur rechnerischen Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushalts (FK, PWP, nFK, kapillarer Aufstieg). UDATA - Umwelt- und Datenanalyse. Ranschbach.

Hillel, D. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, 771 S.

Iden, S.C. & Durner, W. 2007. Free-form estimation of the unsaturated soil fydraulic properties by inverse modeling using global optimization. Water Resour. Res., 43. W07451.

Iden, S. C., Schelle, H., Fank, J. & Durner, W. 2011. Inverse Modellierung des Wasserflusses mit Wurzelwasseraufnahme in Großlysimetern. Jahrestagung der DBG - Kom I. Boden verstehen, Böden nutzen, Böden fit machen. http://www.dbges.de.

Irmak, S. & Mutiibwa, D. 2008. Dynamics of photosyntheic photonflux densitiy and light extinction coefficient to asses radiant energy interactions for maize canopy. Transactions of the ASABE, 51 (5): 1663-1673.

Jansen, U. 2005. Bestimmung effektiver hydraulischer Eigenschaften geschichteter Böden auf der Lysimeterskala durch inverse Modellierung. Diplomarbeit. Abteilung für Bodenkunde und Bodenphysik, Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig (unveröffentlicht), 126 S.

Kunstmann, H., Kinzelbach, W. & Siegfried, T. 2002. Conditional first- order second-moment method and its application to the quantification of uncertainity in groundwater modeling. Water Resources Research 38 (4): 1-14.

Loague, K & Green, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. Journal of Contaminant Hydrology, 7: 51-73.

Loos, C., Gayler, S. & Priesack, E. 2006. Assesment of water balance simulations for large scale weighing lysimeters. Journal of HYdrology 335: 259-270.

Marschner H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Second Edition. Academic Press Limited, 1995, S. 528-535.

Marquardt, D. W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 11, 2:

431-441.

Meissner, R., Rupp, H. & Schubert, M. 2000. Novel lysimeter techniques - A basis for improved ivestigation of water, gas and solute transport in soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences 163: 603-607.

Meissner, R. & Seyfarth, M. 2004. Measuring water and solute balance with new lysimeter techniques. SuperSoil 2004. 3rd Australine New Zealand Soils Conference, University of Sydney.
http://www.regional.org.au/au/asssi/.

Meissner, R., Seeger, J., Rupp, H., Seyfarth, M. & Borg, H. 2007. Measurement of dew, fog and rime with a high-precision gravitation lysimeter. J. Plant Nutr. Soil Sci. 170: 335-344.

Mualem, Y. 1976. A new model predicting the hydraulic conductivity of saturated porous media. Water Resour. Res. 12: 513-522.

Neumann, S. P., Feddes, R. A. & Bresler, E. 1974. Finite element simulation of flow in saturated-unsaturated soils considering water uptake by plants. Third Annual Report, Project No. A10-SWC-77, Hydraulic Engineering Lab., Technion, Haifa, Israel.

Nolz, R., Kovacs, G., Zsembeli, J.& Cepuder, P. 2008. Water balance of two lysimeter sites: Karcag vs. Groß-Enzersdorf. In: 13. Gumpensteiner Lysimetertagung. Lysimeter - Perspektiven in Forschung und Anwendung. 155-158.

Pertassek, T., Peters, A., Durner, W. 2011. HYPROP, Data Evaluation Software, User's Manual, V.1.0.

Peters, A. & Durner, W. 2008. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. Journal of Hydrology, 356: 147-162.

Prasuhn, V., Spiess, E. & Seyfahrt, M. 2009. Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. 13. Gumpensteiner Lysimetertagung 2009: 11-16.

Prasuhn, V. Spiess, E.& Humprys, C. 2011. sickerwasser uns Nitrataustrag - Erste Ergebnisse der Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. 14 Gumpensteiner Lysimetertagung 2011: 206-210.

Prasuhn, V., Spiess, E., Humphrys, C.& Vögeli Albisser, C. 2011. Lysimeterforschung an ART - dem Nitrat auf der Spur. Bulletin BGS 32: 85-90.

Prasuhn, V.. Lysimeteranlage Zürich Reckenholz. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Flyer.

Radcliff, D. E.& Simunek, J. 2010. Spoil Physics with HYDRUS. Modeling and Applications. CRC Press/Taylor & Francis, 373 S.

Richter, O. & Söndgerath, D. 1990. Parameter estimation in ecology: the link between data and models. VCH Weinheim, 218 S.

Ritchie, J. T. 1972: Model for predicting evaporation from a row with incomplete cover. Wat Res. Res 8 (5): 1204-1213.

Schaap, M.G. & Leij, F.J. 2000. Improved prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 843-851.

Schaap, M.G., Leij, F.J. & van Genuchten, M. Th. 2001. ROSETTA: A computer-program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology 251: 163-176.

Schelle, H. 2012. Identification of Soil Hydraulic Properties on Different Scales Using Inverse Modeling. Dissertation. Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Schelle, H., Iden, S.C., Fank, J. & Durner, W. 2012. Inverse modeling of water flow and root water uptake in lysimeters. Vadose Zone Journal. Noch nicht veröffentlicht.

Simunek, J. Wendroth, O. & van Genuchten, M. Th. 1998. Parameter Estimation Analysis if the Evaporation Method for Determining Soil HYdraulic Properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 894-905.

Simunek, J. & Hopmans, J. W 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake. Ecological Modelling 220: 505-521.

Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M. Th. 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Manual, Version 4.08.

UGT (Umwelt-Geräte-Technik)GmbH 2009. Tensio 150 Pressure sonsor tensiometer. UGT, Eberswalder Straße 58, 15374 Müncheberg, Germany. http://www.ugt-online.de.

UGT (Umwelt-Geräte-Technik)GmbH 2009. Tensio 300 Equi-Tensiometer. UGT, Eberswalder Straße 58, 15374 Müncheberg, Germany. http://www.ugt-online.de.

van Genuchten, M. Th. 1980. A Closed-form Equation for predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898.

Vaughan, P. J.& Ayars, J. 2009. Noise Reduction Methods for Weighing Lysimeters. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135 (2): 235-240.

Wahren, A., Feger, K.-H., Schwärzel, K., Münch, A. & Dittrich, I. 2009. Bodenhydraulische Änderungen durch Aufforstung und deren Bedeutung bei der modellgestützten Bewertung des Klimawandeleinflusses auf Standortswasserhaushalt und

Hochwasserentstehung. Jahrestagung der DBG 2009, Kommission VI. Böden - eine endliche Resource. DBG, September 2009, Bonn. http://www.dbges.de.

Wesseling, J. R. 1991. Meerjarige simulaties van grondwaterinttrekking voor verschillende bodemprofielen, grondwatertrappen eb gewassen met het model SWATRE. Report 152, Winand Staring Centre, Wageningen.

Yang, J., Li, B. & Lui, S. 2000. A large weighing lysimeter for evapotranspiration and soil-water-groundwater exchange studies. Hydrol. Process. 14: 1887-1897.

Zurmühl, T. 1998. Capability of convection-dispersion transport models to predict transient water and solute movement in undisturbed soil columns. Journal of Hydrology 30: 101-128.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit (Inverse Modellierung des Wassertransports in bewachsenen Großlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz) selbstständig verfasst und alle benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe.

Braunschweig, den 21. Juni 2012

Anhang

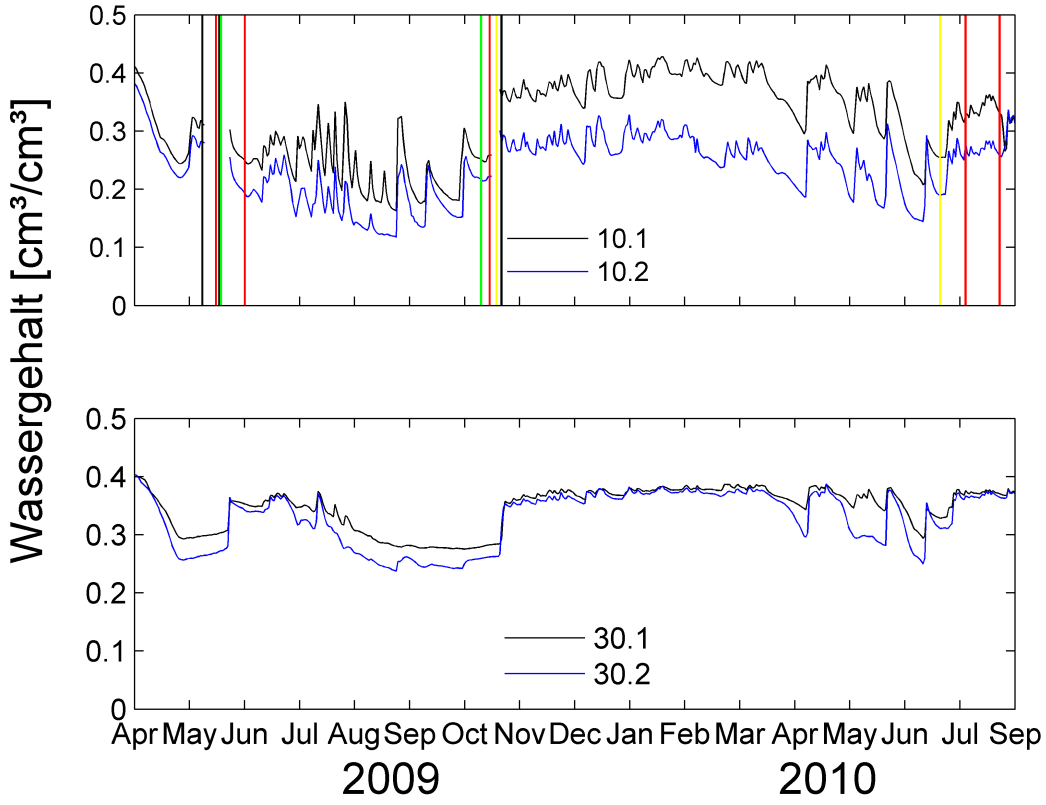

Abbildung 27: Tägliche Daten der FDR-Messungen in 10 und 30 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10.

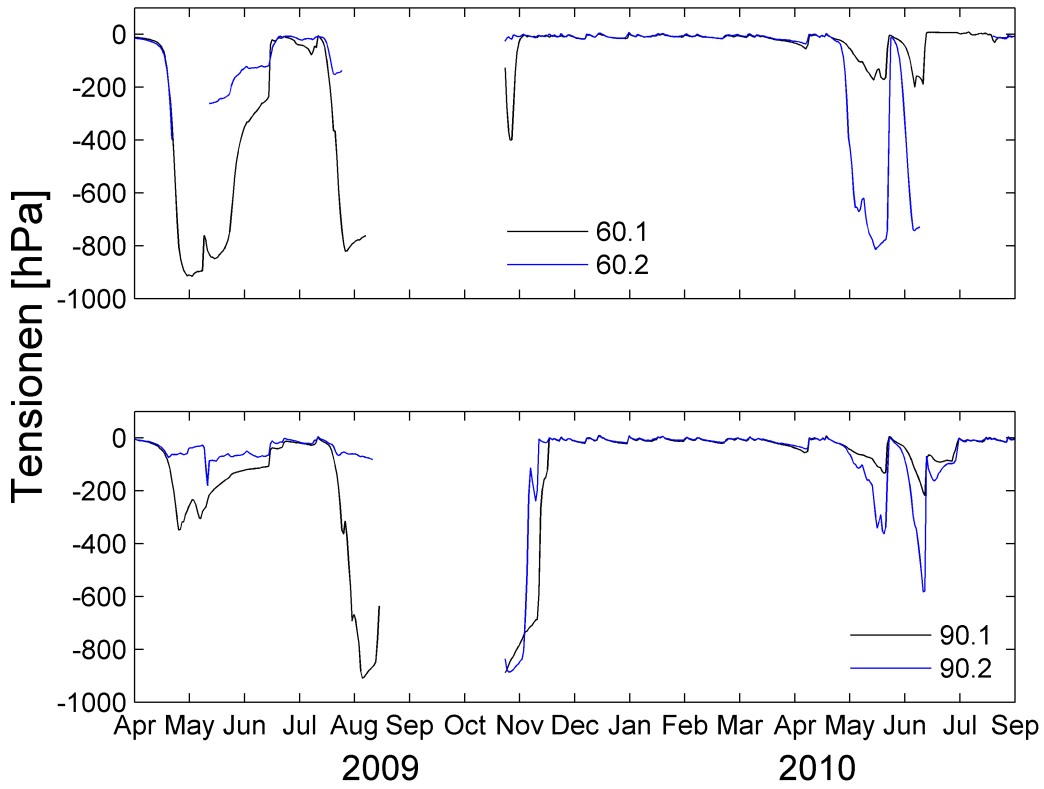

Abbildung 28: Tägliche Daten der Tensionsmessungen in 60 und 90 cm Tiefe vom 1.04-09 - 1.09.10 für Lysimeter 5.

Tabelle 14: Root Mean Square Errors (RMSE) der Ergebnisse der inversen Simulationen der unterschiedlichen Szenarien. RH = Reckenholz, SH = Schafisheim, M = Maisperiode, W = Weizenperiode.

Szenario	Q [cm]	Θ [$cm^3\,cm^{-3}$]
RH	0,52	0,0070
RH_M	0,10	0,0025
RH_W	0,53	0,0064
SH	0,45	0,0055
SH_M	0,18	0,0027
SH_W	0,52	0,0049

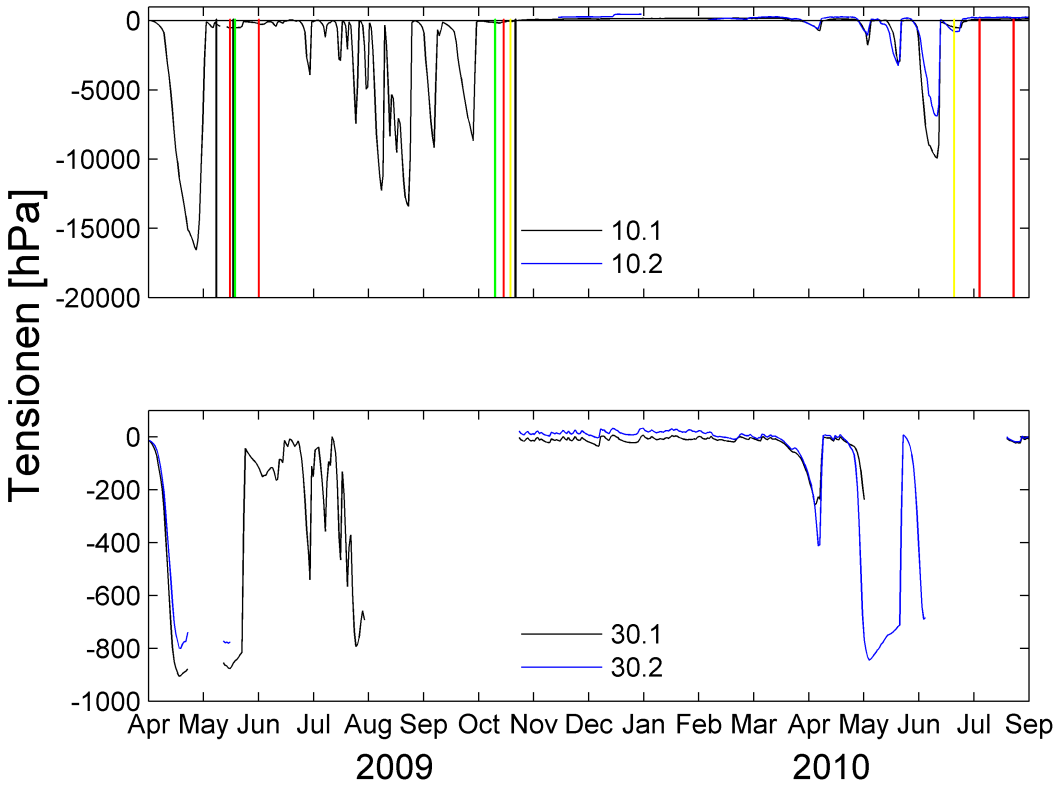

Abbildung 29: Tägliche Daten der Tensionsmessungen in 10 und 30 cm Tiefe vom 01.04.09 - 01.09.10.

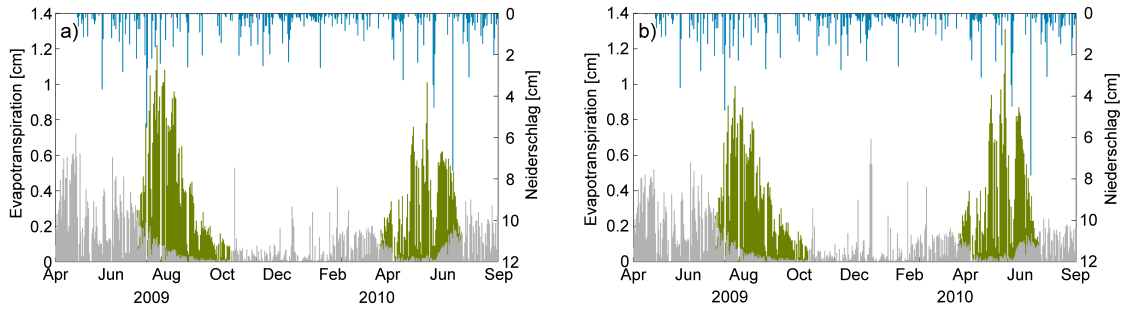

Abbildung 30: Obere Randbedingung der Lysimeters 5 (a) und 12 (b) für den Zeitraum 1.4.09 - 1.9.10.

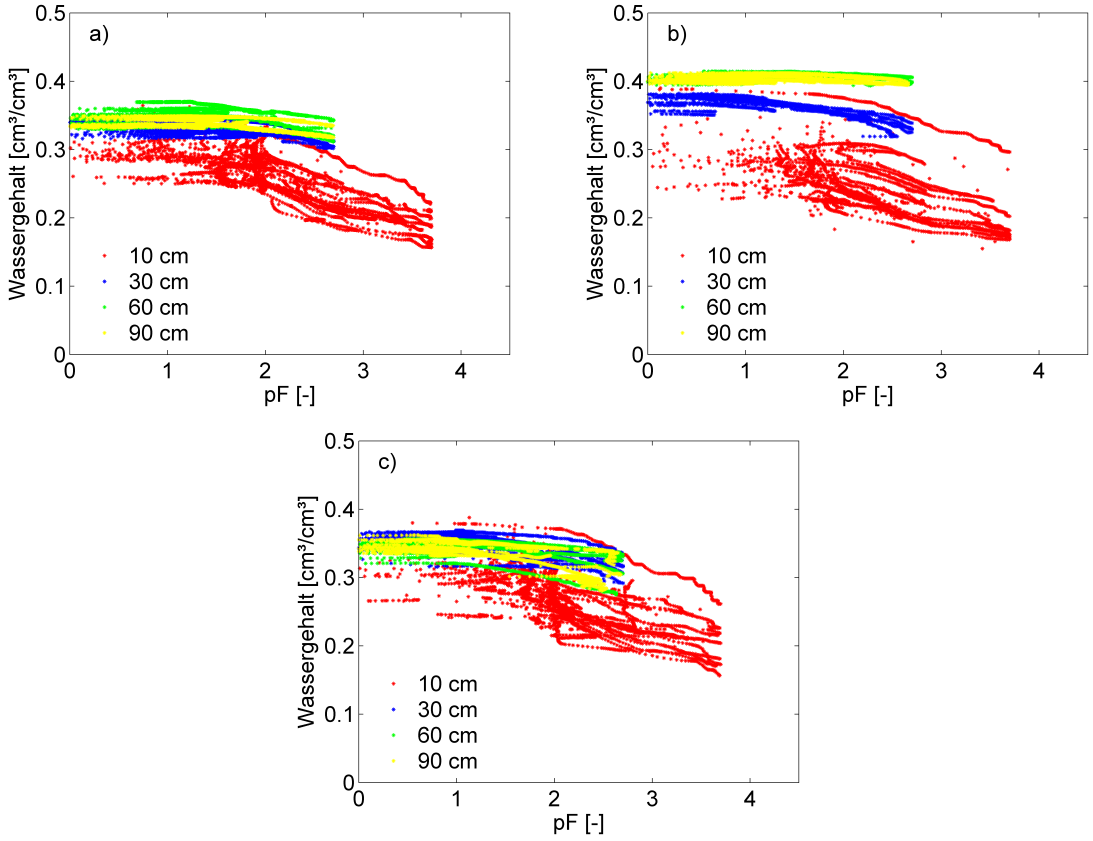

Abbildung 31: Korrigierte Retentionskurven der Lysimeter 1 (a), 5 (b) und 12 (c).

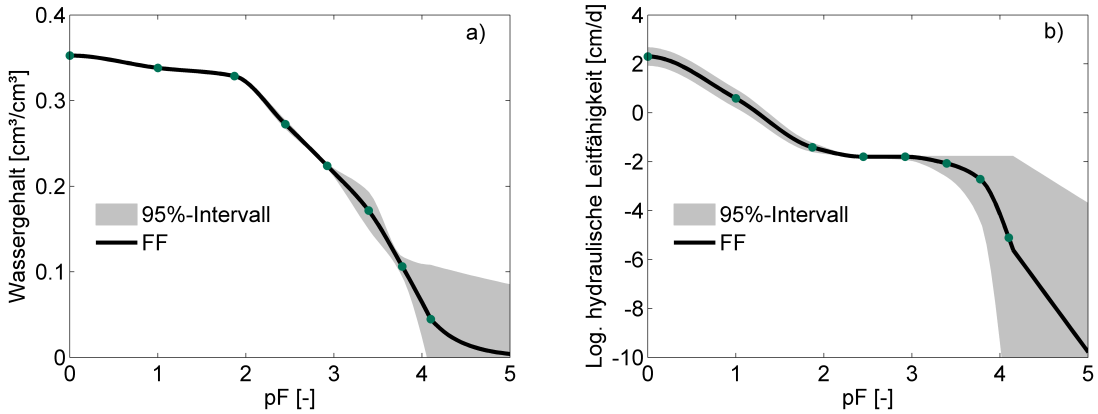

Abbildung 32: Retentions- (a) und Leitfähigkeitskurve (b) für Lysimeter 1 (Grafenried) mit dem Free-Form-Ansatz (FF). Die grünen Punkte stellen die ermittelten bodenhydraulischen Parameter dar. Θ_s und K_s jeweils bei pF 0.

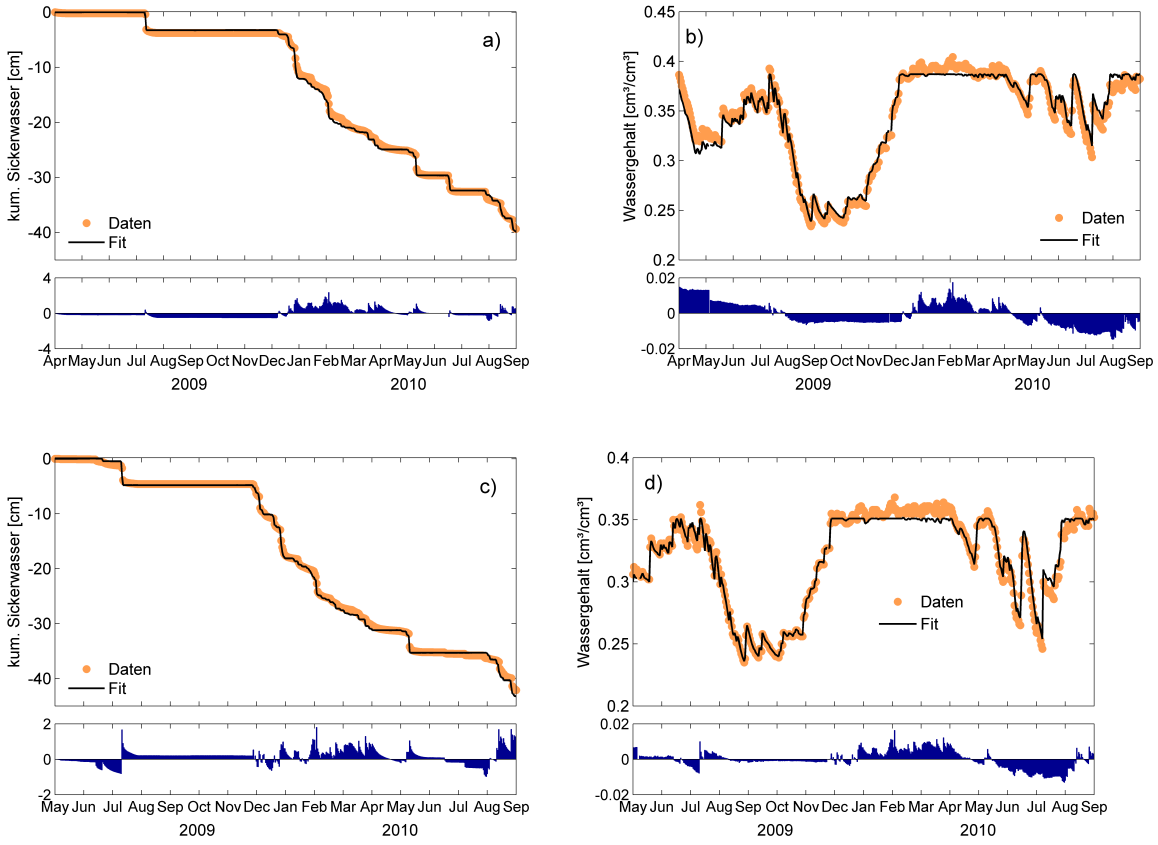

Abbildung 33: Kumulatives Sickerwasser (a und c) und profilgemittelter Wassergehalt (b und d) und inverse Simulation (schwarze Linie) der Lysimeter 5 (oben) und 12 (unten).

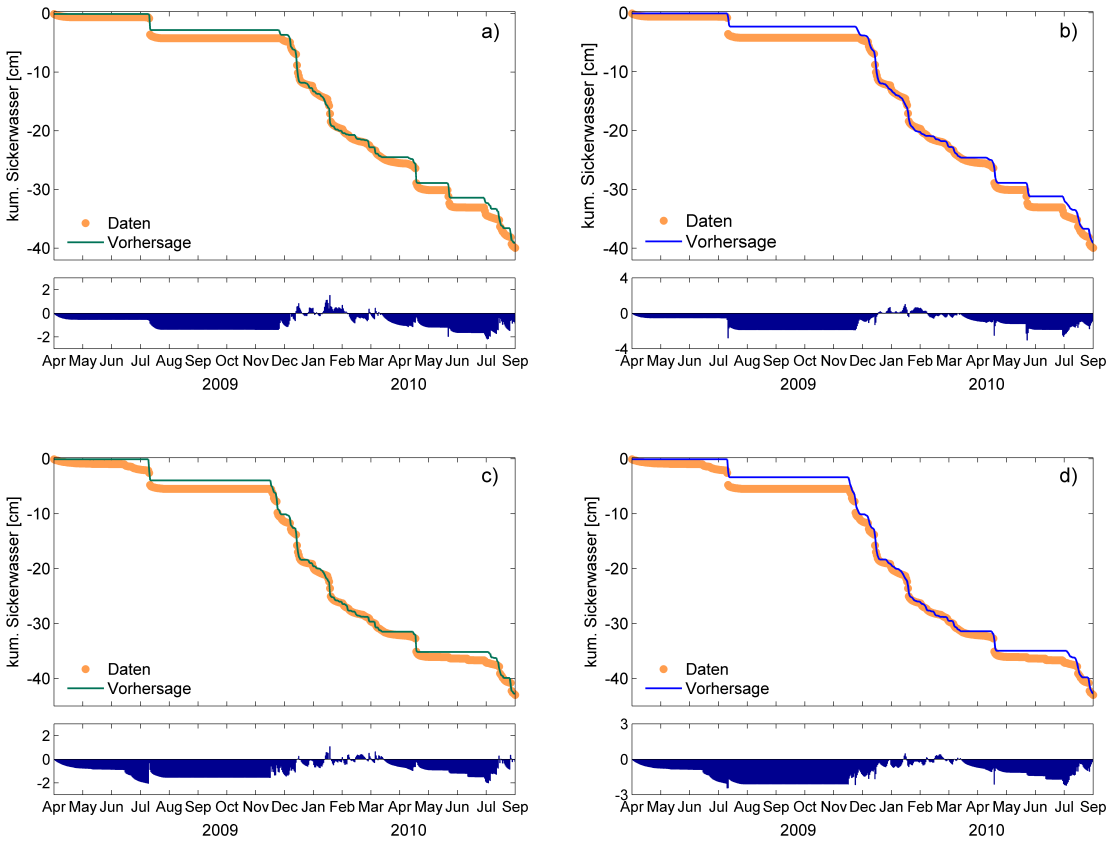

Abbildung 34: Vorhersagen des Sickerwassers anhand der in situ-Daten (a und c) und der Pedotransferfunktion Rosetta Lite (b und d) für Lysimeter 5 (oben) und 12 (unten).

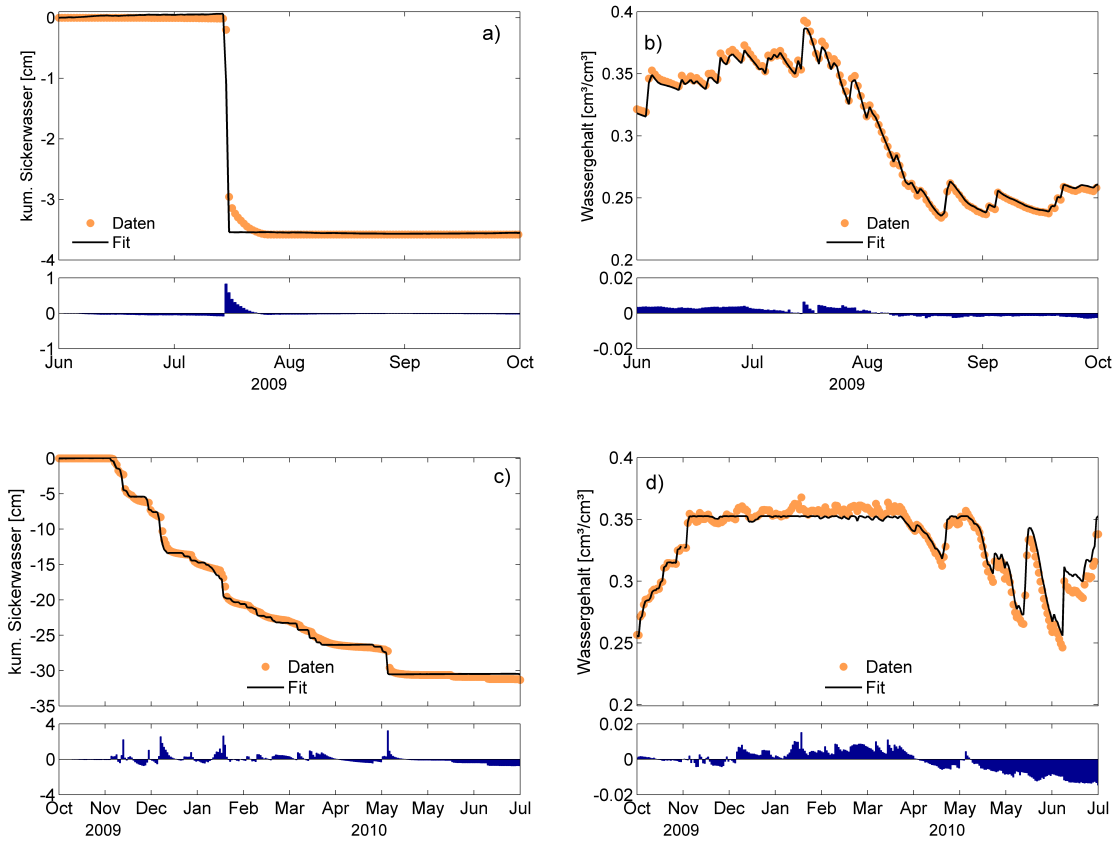

Abbildung 35: Kumulatives Sickerwasser (a und c) und profilgemittelter Wassergehalt (b und d) und inverse Modellierung (schwarze Linie) des Lysimeters 5 für die Abschnitte Mais (oben) und Weizen (unten).

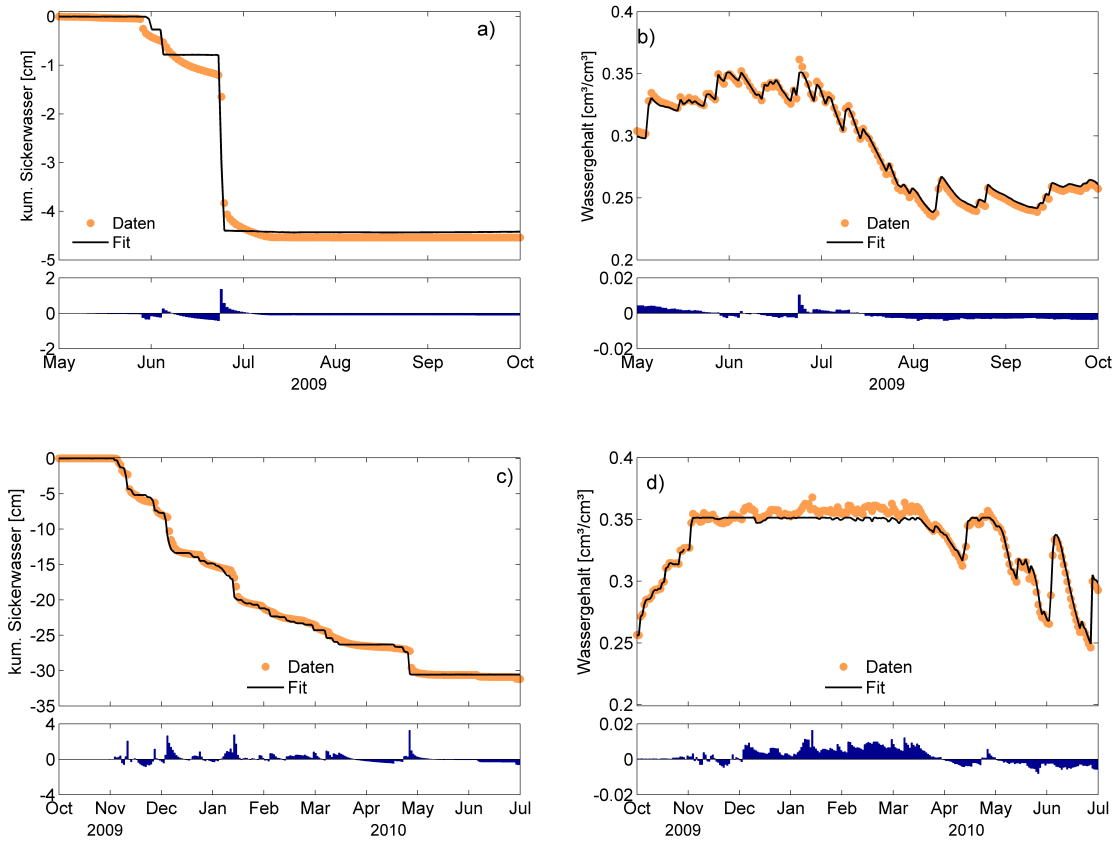

Abbildung 36: Kumulatives Sickerwasser (a und c) und profilgemittelter Wassergehalt (b und d) und inverse Modellierung (schwarze Linie) des Lysimeters 12 für die Abschnitte Mais (oben) und Weizen (unten).

Tabelle 15: Durch inverse Modellierung ermittelte bodenhydraulische Eigenschaften der drei Szenarien Körnermais, Winterweizen und Körnermais + Winterweizen für Lysimeter 5 (Reckenholz) und 12 (Schafisheim). Zusätzlich ist die Standardabweichung σ der geschätzten Parameter angegeben. VGM = van Genuchten-Mualem.

Szenario	VGM-Parameter		σ
Reckenholz			
Mais	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,07	$4{,}17{\cdot}10^{-4}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,39	$6{,}22{\cdot}10^{-4}$
	α [cm^{-1}]	0,001	$6{,}79{\cdot}10^{-5}$
	n [-]	2,10	$3{,}7{\cdot}10^{-4}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	731	$2{,}50{\cdot}10^{1}$
	τ [-]	-1,15	$6{,}82{\cdot}10^{-3}$
Weizen	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,04	$2{,}06{\cdot}10^{-4}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,35	$6{,}40{\cdot}10^{-4}$
	α [cm^{-1}]	0,001	$3{,}89{\cdot}10^{-5}$
	n [-]	2,38	$1{,}62{\cdot}10^{-3}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	771	$1{,}80{\cdot}10^{1}$
	τ [-]	-0,66	$3{,}95{\cdot}10^{-3}$
Mais+Weizen	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,1	$2{,}37{\cdot}10^{-4}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,39	$5{,}30{\cdot}10^{-4}$
	α [cm^{-1}]	0,002	$2{,}6{\cdot}10^{-5}$
	n [-]	2,61	$4{,}08{\cdot}10^{-3}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	514	$1{,}30{\cdot}10^{1}$
	τ [-]	-1,16	$4{,}78{\cdot}10^{-4}$
Schafisheim			
Mais	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,11	$5{,}82{\cdot}10^{-4}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,36	$1{,}15{\cdot}10^{-3}$
	α [cm^{-1}]	0,003	$7{,}16{\cdot}10^{-5}$
	n [-]	2,10	$4{,}73{\cdot}10^{-4}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	2371	$1{,}58{\cdot}10^{2}$
	τ [-]	1,69	$9{,}75{\cdot}10^{-3}$
Weizen	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,08	$3{,}16{\cdot}10^{-4}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,35	$5{,}13{\cdot}10^{-4}$
	α [cm^{-1}]	0,001	$1{,}81{\cdot}10^{-5}$
	n [-]	1,86	$4{,}57{\cdot}10^{-4}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	1822	$4{,}80{\cdot}10^{1}$
	τ [-]	1,71	$9{,}02{\cdot}10^{-3}$
Mais+Weizen	Θ_r [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,10	$1{,}52{\cdot}10^{-4}$
	Θ_s [$cm^3\,cm^{-3}$]	0,35	$5{,}04{\cdot}10^{-3}$
	α [cm^{-1}]	0,002	$1{,}35{\cdot}10^{-5}$
	n [-]	1,70	$6{,}50{\cdot}10^{-4}$
	K_s [$cm\,d^{-1}$]	1869	$2{,}30{\cdot}10^{1}$
	τ [-]	1,26	$2{,}52{\cdot}10^{-3}$

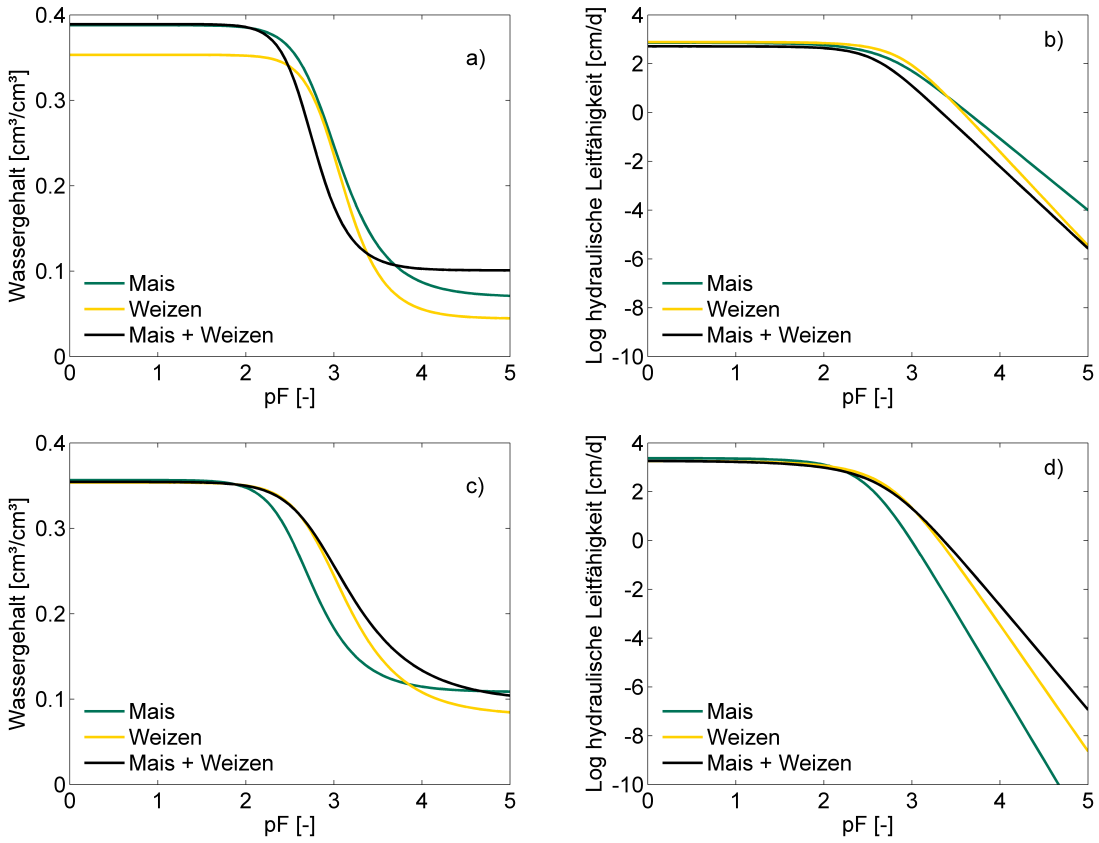

Abbildung 37: Retentions- (a und c) und Leitfähigkeitsfunktionen (b und d) für Lysimeter 5 (Reckenholz) und 12 (Schafisheim). Verglichen werden die Vegetationsperdioden für Mais, Weizen und die Gesamtsimulation.

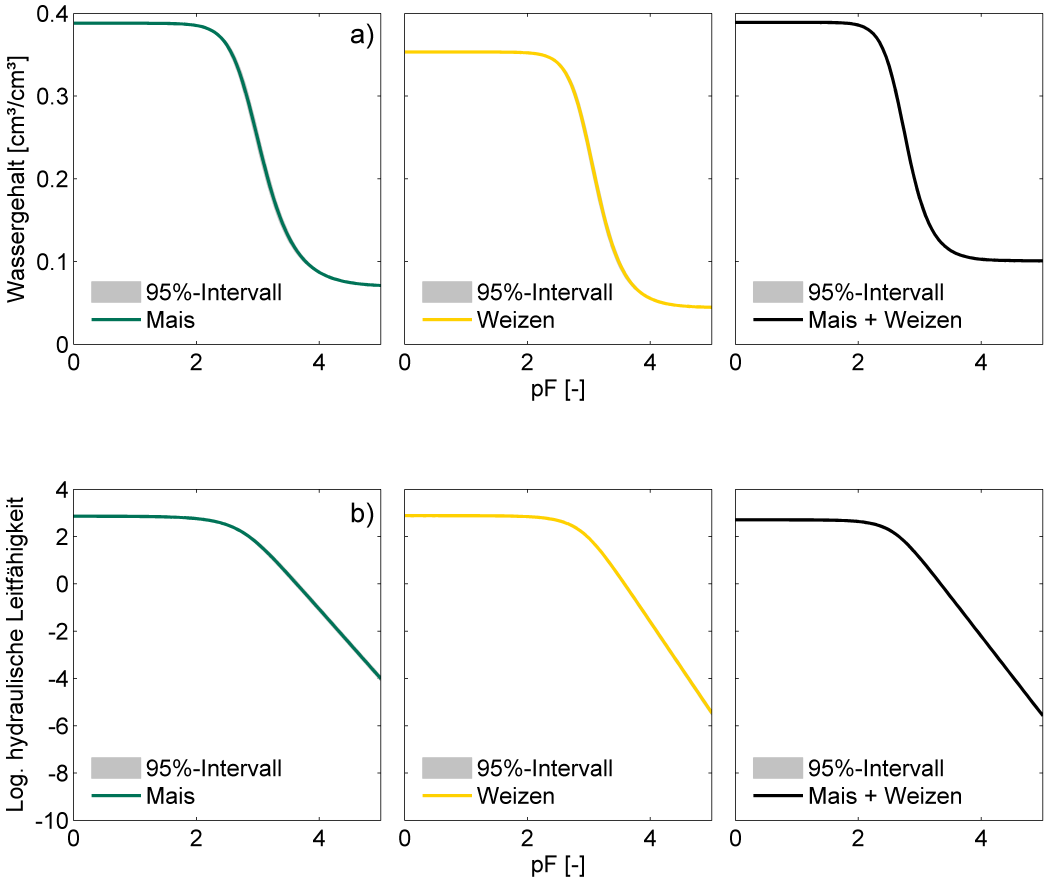

Abbildung 38: 95%-Konfidenzintervalle der Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) der drei Szenarien für Lysimeter 5 (Reckenholz).

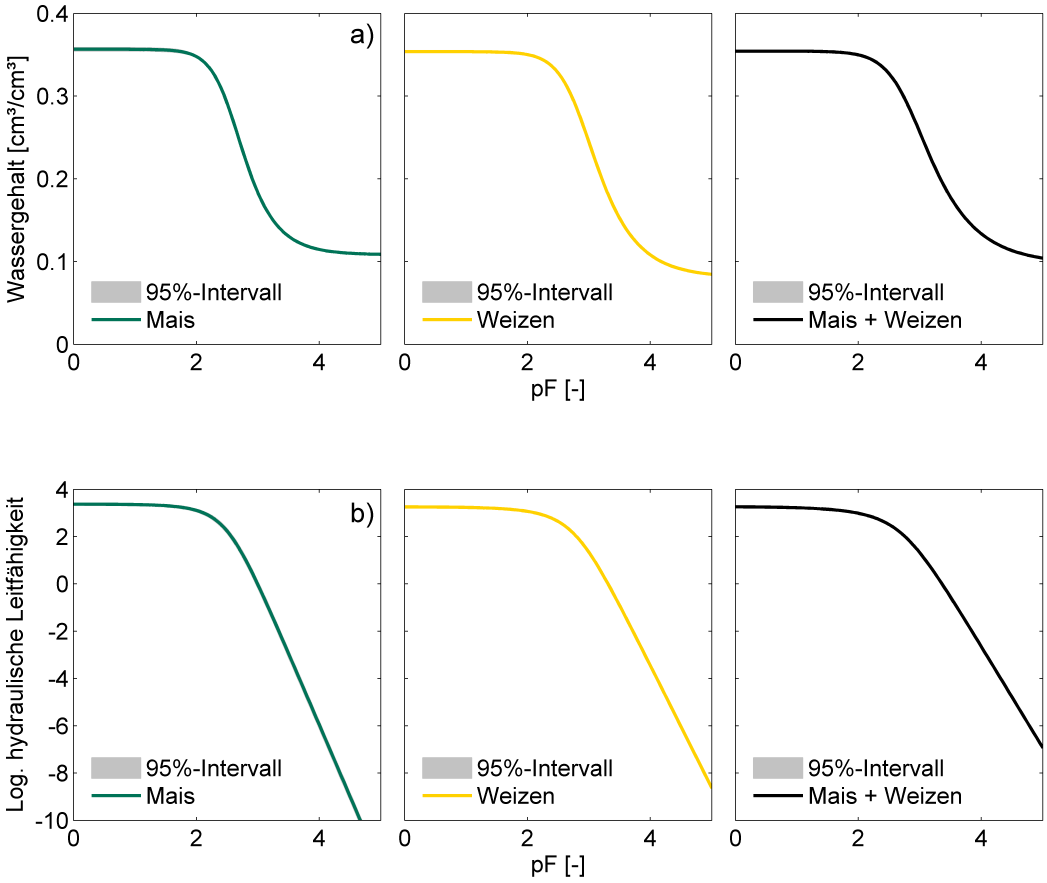

Abbildung 39: 95%-Konfidenzintervalle der Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) der drei Szenarien für Lysimeter 12 (Schafisheim).